



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea magistrale Ingegneria Edile

**Il degrado del calcestruzzo armato nelle strutture esistenti: patologie,
diagnostica e recupero. Caso studio di un edificio di civile abitazione
sito nella zona costiera di Ostia (RM).**

**The deterioration of reinforced concrete in existing structures:
pathologies, diagnostics and recovery. Case study of a residential
building located in the coastal area of Ostia (RM).**

Relatrice: Chiar.ma
Prof. ssa Valeria CORINALDESI

Tesi di Laurea di:
Raffaella Ciarlo

Correlatore:
Dr. Ing. Davide BASILE

A.A. 2021 / 2022

*A Lorenzo,
per aver creduto in me più di me stessa*

*Alla mia Famiglia,
per avermi sostenuta e incoraggiata*

*A mio nonno Fortunato
che mi protegge dalla stella più bella che c'è*

INDICE

INTRODUZIONE	- 1 -
CAPITOLO 1 IL DEGRADO DEL C.A.: DEFINIZIONE DEL PROBLEMA	- 2 -
CAPITOLO 2 BREVE STORIA DEL CALCESTRUZZO ARMATO	- 4 -
CAPITOLO 3 COSTITUENTI DEL CALCESTRUZZO ARMATO	- 6 -
3.1 CEMENTO	- 8 -
3.1.1 <i>Forme di alterazione o degrado dovuti al cemento</i>	- 11 -
3.2 AGGREGATI	- 12 -
3.2.1 <i>Forme di alterazione o degrado dovuti agli aggregati</i>	- 15 -
3.3 ACQUA D'IMPASTO	- 17 -
3.3.1 <i>Forme di alterazione o degrado dovuti all'acqua di impasto</i>	- 18 -
3.4 ADDITIVI	- 19 -
3.4.1 <i>Forme di alterazione dovuti agli additivi</i>	- 21 -
3.5 AGGIUNTE	- 22 -
3.5.1 <i>Forme di alterazione dovuti alle aggiunte</i>	- 23 -
3.6 BARRE D'ARMATURA	- 23 -
CAPITOLO 4 IL DEGRADO NELLE STRUTTURE IN C.A.	- 25 -
4.1 DURABILITÀ DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO	- 25 -
4.2 FORME RICORRENTI DI ALTERAZIONE E DEGRADO DEL C.A.	- 28 -
4.2.1 <i>Macchie e alterazioni cromatiche</i>	- 29 -
4.2.2 <i>Perdita di boiaccia</i>	- 30 -
4.2.3 <i>Cavillature e fessurazioni diffuse</i>	- 31 -
4.2.4 <i>Macrobolle</i>	- 32 -
4.2.5 <i>Colonizzazioni biologiche</i>	- 34 -
4.2.6 <i>Efflorescenze e subflorescenze</i>	- 34 -
4.2.7 <i>Dilavamento superficiale</i>	- 35 -
4.2.8 <i>Deposito di particolato atmosferico</i>	- 36 -
4.2.9 <i>Distacchi di intonaci e rivestimenti e pellicole pittoriche</i>	- 37 -
4.2.10 <i>Vespai e nidi di ghiaia</i>	- 39 -
4.2.11 <i>Riprese di getto</i>	- 40 -
4.2.12 <i>Pop-out</i>	- 42 -
4.2.13 <i>Distacco dello strato corticale o di usura delle pavimentazioni</i>	- 43 -
4.2.14 <i>Corrosione delle armature metalliche ed espulsione del copriferro</i>	- 44 -

CAPITOLO 5 IL PROCESSO DIAGNOSTICO	- 50 -
5.1 PRIMA FASE: PRE-DIAGNOSI	- 51 -
5.2 SECONDA FASE: INDAGINI IN SITU	- 57 -
5.2.1 Prova magnetometrica.....	- 62 -
5.2.2 Prova Pull-off.....	- 65 -
5.2.3 Termografia ad infrarossi.....	- 67 -
5.2.4 Prove sclerometriche	- 69 -
5.2.5 Determinazione del potenziale di corrosione.....	- 71 -
5.2.6 Rilievo colorimetrico della carbonatazione.....	- 75 -
5.2.7 Rilievo colorimetrico degli ioni cloruro.....	- 80 -
5.2.8 Indagini ultrasoniche.....	- 82 -
5.2.9 Prova di estrazione Pull out.....	- 84 -
5.2.10 Indagini radar	- 87 -
5.2.11 Prove endoscopiche.....	- 90 -
5.2.12 Prelievo di campioni cilindrici di calcestruzzo	- 91 -
5.2.13 Prelievo di campioni di acciaio.....	- 92 -
5.3 TERZA FASE: PROVE DI LABORATORIO.....	- 93 -
5.3.1 Determinazione della resistenza a compressione su campioni di cls cilindrici ...	- 94 -
5.3.2 Determinazione della resistenza a trazione sugli spezzoni metallici	- 96 -
5.4 QUARTA FASE: DIAGNOSI.....	- 98 -
5.4.1 Interpretazione dei risultati.....	- 99 -
5.4.2 Individuazione cause.....	- 99 -
5.5 QUINTA FASE: INTERVENTI DI RECUPERO E RINFORZO.....	- 99 -
5.5.1 Interventi di ripristino e recupero della sezione in c.a.	- 100 -
5.5.2 Sigillatura delle lesioni	- 102 -
5.5.3 Rinforzo statico delle strutture in c.a.	- 103 -
CAPITOLO 6 IL CASO DI STUDIO.....	- 106 -
6.1 INQUADRAMENTO DELL'EDIFICIO.....	- 106 -
6.2 ANALISI STORICO-CRITICA	- 107 -
6.2.1 RILIEVO METRICO	- 108 -
6.2.2 RILIEVO PATOLOGICO.....	- 109 -
6.3 INDAGINI IN SITU	- 112 -
6.3.1 Prove magnetometriche	- 119 -
6.3.2 Prelievo di campioni cilindrici di calcestruzzo.....	- 122 -
6.3.3 Rilievo colorimetrico del fronte di carbonatazione.....	- 126 -
6.3.4 Rilievo della profondità di penetrazione degli ioni cloruro.....	- 134 -
6.3.5 Prova di estrazione Pull out.....	- 137 -
6.3.6 Prove endoscopiche	- 141 -
6.4 PROVE DI LABORATORIO	- 151 -
6.4.1 Prova di compressione su provini cilindrici di calcestruzzo.....	- 151 -
6.5 DIAGNOSI.....	- 152 -

6.5.1	<i>Interpretazione dei risultati</i>	- 152 -
6.5.2	<i>Individuazione delle cause</i>	- 156 -
6.6	PROPOSTA DI INTERVENTI DI RECUPERO	- 156 -
6.6.1	<i>Preparazione dei supporti</i>	- 157 -
6.6.2	<i>Protezione dei ferri di armatura:</i>	- 158 -
6.6.3	<i>Sigillatura lesioni</i>	- 160 -
6.6.4	<i>Ripristino del cls</i>	- 161 -
6.6.5	<i>Rinforzo con FRP</i>	- 162 -
6.6.6	<i>Protezione del cls</i>	- 163 -
6.6.7	<i>Pitturazione</i>	- 164 -
	CONCLUSIONI	- 165 -
	BIBLIOGRAFIA	- 167 -

INTRODUZIONE

Obiettivo del presente elaborato di tesi è l'approfondimento della conoscenza dei materiali che compongono le strutture in conglomerato cementizio armato, interessate da degrado e dalle tecniche di intervento adottate per il loro ripristino.

Il cemento armato, dopo circa un secolo di vita, ha manifestato la sua vulnerabilità all'azione del tempo, degli agenti atmosferici, dei terremoti. Le proporzioni del fenomeno sono tali da impedire qualunque tentativo di soluzione basato sulla sostituzione programmata delle costruzioni esistenti, perciò in questi anni, è crescente l'interesse per il degrado ed il recupero delle strutture in cemento armato, sia per salvaguardare il patrimonio edilizio esistente sia, quando risulti necessari, per aumentarne i coefficienti di sicurezza strutturale.

Il problema già di per sé rilevante, ne causa immediatamente un secondo, quello della corretta progettazione dei nuovi edifici, volti a minimizzarne il deterioramento evitando, per il futuro, ingenti ed imprevisi costi di recupero. È indispensabile diffondere una concezione del cemento armato, più completa ed articolata che porti a scegliere i materiali anche in base alla durabilità e non più solo sulla resistenza.

Il presente lavoro di tesi nasce in seguito all'esperienza maturata nel periodo di tirocinio svolto presso l'azienda Classedil S.r.l. di Ravenna in affiancamento e supporto agli Sperimentatori PND durante le campagne di indagini diagnostiche condotte su strutture di diversa tipologia (c.a., muratura, legno e acciaio) e complessità.

L'obiettivo della tesi è dunque quello di approfondire la conoscenza dei materiali che compongono le strutture in conglomerato cementizio armato interessate da degrado e delle tecniche di intervento adottate per il loro ripristino per poi passare all'analisi del caso studio posto sul litorale di Ostia la cui esposizione ad un ambiente fortemente aggressivo e la scarsa attenzione alla manutenzione, hanno accelerato l'avanzamento del fenomeno di degrado

Capitolo 1

IL DEGRADO DEL C.A.: DEFINIZIONE DEL PROBLEMA

Per *degrado delle strutture in cemento armato* si intende la “perdita delle prestazioni iniziali a seguito di eventi lenti legati all’ effetto di agenti naturali (gelo-disgelo, aerosol marino, ecc.) o artificiali (ambienti industriali)” presenti nell’ ambiente aggressivo in cui è posta la costruzione ¹. In questo termine non è incluso il dissesto che è relativo alla perdita delle prestazioni meccaniche causata da eventi straordinari (terremoti, incendi, esplosioni, ecc.), dal cambiamento dei sovraccarichi agenti (ad esempio variazioni della destinazione d’uso per gli edifici, cambiamento della massa dei veicoli per i ponti, piste aeroportuali ecc.), da errate previsioni progettuali.

Con il termine *durabilità* si definisce invece la capacità di un materiale a resistere alle azioni atmosferiche, agli attacchi chimici o ad altri processi deteriorativi, conservando nel tempo le prestazioni iniziali.

Uno studio condotto negli anni ’70 (Olazabel & Traversa, 1977) riporta una statistica eseguita su 139 edifici affetti da diverse patologie e riconducibili a 6 cause principali:

Cause	Descrizione	N° Strutture	Totale	%
Tecnologiche	Cls di qualità scadente	31	58	41.73%
	Attacco chimico cls	12		
	Copriferro inadeguato	9		
	Materiali di base non idonei	6		
Costruttive	Scarso controllo della messa in opera	19	31	22.30%
	Ignoranza delle tecniche costruttive	12		
Strutturali	Calcolo strutturale incompleto o errato	28	28	20.14%
Sovraccarichi	Variazione destinazione d’uso	11	11	7.91%
Accidentali	Incendio	6	6	4.32%
Combinata	Risultano da almeno due condizioni delle precedenti	5	5	3.60%
Totale complessivo			139	100%

Tabella 1 - Vulnerabilità degli edifici in c.a. secondo lo studio Olazabel-Traversa

¹ Specificata fonte non valida.

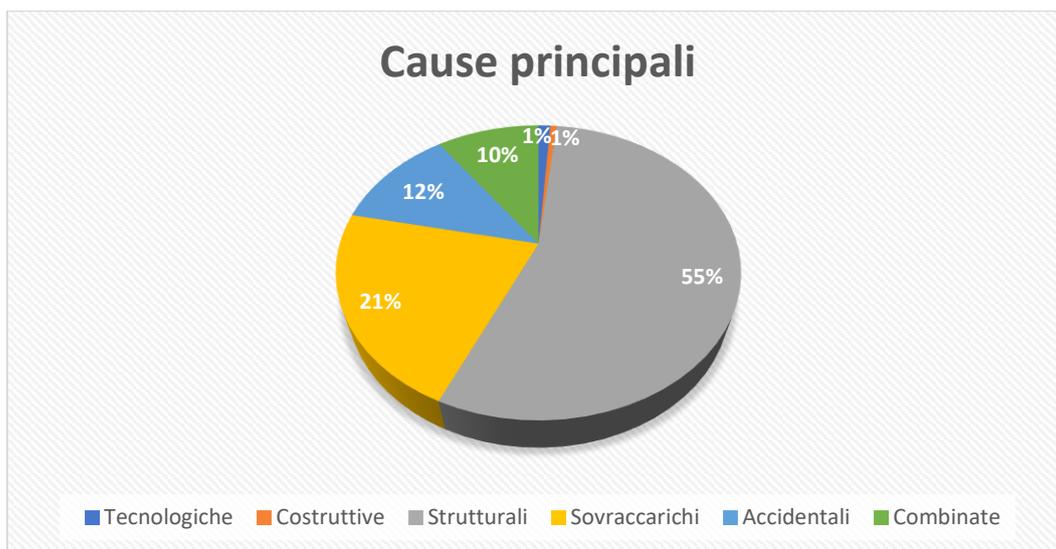


Figura 1 - Grafico relativo ai dati riportati in Tabella 1

Dal grafico riportato in Figura 1 risulta evidente come la gran parte degli ammaloramenti siano da riferire alla bassa qualità dei materiali impiegati, alla cattiva esecuzione dell'opera accompagnata da uno scarso controllo da parte della Direzioni Lavori e/o della Direzione di Cantiere.

Utilizzando le definizioni precedentemente esposte è possibile filtrare i dati della tabella escludendo i casi riconducibili ai dissesti strutturali, al cambiamento di sovraccarichi e agli avvenimenti di natura accidentale, ottenendo come risultato che le patologie riscontrate su novantadue strutture sono imputabili a problematiche di natura tecnologica e costruttiva. In particolare, per 3 delle 92 strutture in esame è definibile una indesiderabile sinergia dissesto più degrado (ad esempio cedimento di fondazioni in ambiente aggressivo). In sostanza il 97% dei fenomeni di degrado è dovuto a fenomeni ormai noti che non possono più essere ignorati in una progettazione accorta ed oculata. Si pone allora l'interrogativo di come sia possibile prevenire il degrado delle strutture in conglomerato cementizio armato e, soprattutto, se siano stati fatti passi in avanti rispetto al passato. Per trovare una risposta a tali domande è necessario aprire come si sia evoluto nel tempo il cemento armato.

Capitolo 2

BREVE STORIA DEL CALCESTRUZZO ARMATO

La nascita del calcestruzzo armato risale alla fine del XIX secolo, con le sperimentazioni di Joseph Monier, giardiniere francese insoddisfatto dei vasi da fiore in commercio in quell'epoca. I vasi di terracotta erano secondo lui troppo fragili e quelli in legno non resistevano bene alle intemperie e alla crescita delle radici delle piante. Decise quindi di sperimentarne la realizzazione attraverso l'impiego nuovi materiali.

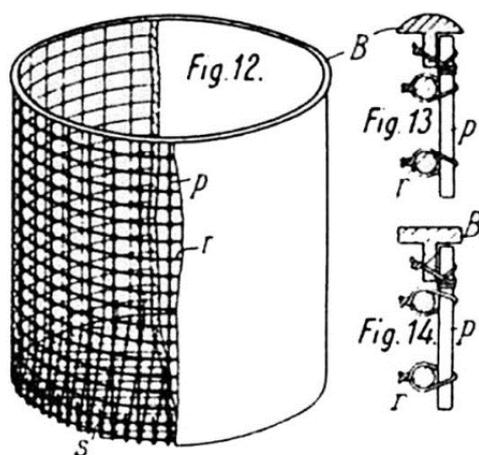


Figura 2 - Il vaso in cemento rinforzato di Monier

(Fonte: www.this-magazin.de)

Cominciò a produrre vasi utilizzando il cemento ma si accorse che erano fragili e si fessuravano rapidamente. Per risolvere il problema annegò una rete in ferro nell'impasto di cemento e il risultato fu sorprendente. I vasi erano resistenti ed avevano prestazioni migliori rispetto a quelli realizzati con i precedenti materiali. Decise quindi di brevettare la sua scoperta e presentarla all'Esposizione Universale di Parigi del 1867.

L'ingegnere francese François Hennebique, in visita all'esposizione universale di Parigi del 1867, notò subito l'invenzione di Monier. Fu attratto da questo nuovo materiale e iniziò a sperimentare per conto proprio il modo di applicare questa tecnica al settore delle costruzioni. Dopo anni di sperimentazioni, nel 1892 Hennebique brevettò un sistema costruttivo che utilizzasse il cemento armato come materiale da costruzione e iniziò a vendere questa tecnologia costruttiva in tutta Europa facendo leva sulle ottime proprietà di resistenza al fuoco con lo slogan «*Plus d'incendies desastreux*» (Non più incendi disastrosi).

Prima ancora di Joseph Monier, il francese Joseph-Louis Lambot iniziò a sperimentare le possibilità costruttive che si potevano ottenere unendo ferro e cemento

concentrandosi sulla realizzazione di barche. Brevettò la sua invenzione nel 1855 e la presentò in quello stesso anno all'Esposizione Universale di Parigi del 1855. Poiché la realizzazione di scafi in ferro-cemento non ebbe grande successo dovettero passare circa dieci anni prima che il cemento armato trovasse la sua applicazione nel settore delle costruzioni.



Figura 3 - La barca di Lambot (1855)

(Fonte: marinecue.it)

il primo fondamento scientifico alla nuova tecnica delle costruzioni.

Un'importante innovazione si ha nel 1892 con François Hennebique al quale si deve l'invenzione delle staffe con cui era possibile assorbire meglio gli sforzi di taglio ed assicurare allo stesso tempo maggiore coesione tra calcestruzzo e barre d'acciaio. Hennebique propone un metodo di calcolo per il progetto di due tipi di sezioni inflesse, rettangolare e a "T". Le ricerche dei pionieri citati avevano chiarito il modo di collaborare del calcestruzzo con l'acciaio e consentirono pertanto il passaggio in breve tempo dall'utilizzo empirico e sperimentale del materiale a realizzazioni in cui il calcestruzzo armato veniva impiegato secondo le sue specifiche peculiarità.

Nonostante la massima attenzione degli esecutori nella progettazione e nella messa in opera del nuovo materiale data la mancanza di una regolamentazione specifica, nel 1900 si verificò il crollo di una passerella all'Esposizione universale di Parigi causando 9 morti e numerosi feriti. L'incidente sottolineò la necessità di regolamentare la messa in opera e il dimensionamento delle opere in calcestruzzo armato e nel 1906 fu pubblicato un volume contenente le istruzioni per la progettazione, una circolare esplicativa ed il resoconto dei lavori.

Sulla scia del progresso avvenuto in Francia, anche in Italia nel 1907 venne emanato il primo strumento legislativo che regolamentava le strutture in cemento armato favorendone così la progressiva diffusione anche nel nostro paese, dapprima con i fabbricati industriali e in seguito con edifici pubblici ed abitazioni.

Capitolo 3

COSTITUENTI DEL CALCESTRUZZO ARMATO

Il confezionamento del calcestruzzo armato deve avvenire utilizzando componenti che rispondono a una serie di requisiti chimico fisici tali da ottenere un conglomerato cementizio con le prestazioni reologiche ed elasto-meccaniche richieste. Inoltre, tutti i costituenti devono garantire che le prestazioni restino invariate durante la vita nominale dell'opera prevista per la struttura per evitare che sia soggetta alle diverse forme di degrado e alterazione.

I requisiti da rispettare nella scelta dei componenti da utilizzare nel confezionamento del calcestruzzo possono essere raggruppati in tre diverse tipologie:

- Requisiti di tipo chimico-fisico, i quali forniscono le prestazioni reologiche della miscela allo stato fresco;
- Requisiti elasto-meccanici, i quali invece garantiscono le prestazioni di tipo reologico della miscela allo stato indurito;
- Requisiti specifici, ovvero requisiti ad hoc inerenti all'opera per la quale la miscela è destinata.

Diventa quindi di fondamentale importanza la scelta della materia prima adottata, che darà forma alla miscela, così da essere in grado di evitare l'eventuale utilizzo di materiali aventi al loro interno sostanze indesiderate, che potrebbero portare effetti negativi inerenti alle caratteristiche standard che dovrebbe possedere una miscela (dal punto di vista qualitativo, prestazionale e di durabilità).

È bene prestare attenzione anche alle diverse fasi di lavorazione del calcestruzzo, in quanto è possibile incappare in errori ricorrenti: durante la produzione del calcestruzzo può essere fatta una scelta sbagliata delle materie prime, ma può essere eseguito anche un controllo non idoneo dell'umidità dell'aggregato che porta all'ottenimento di un rapporto acqua/cemento non adatto alla miscela premeditata. Durante la fase di lavorazione del calcestruzzo in cantiere è bene porre attenzione alla quantità di acqua aggiunta nelle betoniere, all'accuratezza posta nella preparazione e nel

posizionamento dei casseri e nella predisposizione dei ferri d'armatura; ma risulta anche di estrema importanza che non si commettano errori durante la fase di posa in opera e compattazione del calcestruzzo e il suo conseguente tempo di maturazione.

Se ci si trova di fronte a una struttura in calcestruzzo armato si deve porre ulteriore attenzione a diversi fattori, come a un adeguato spessore del copriferro e adeguato numero e disposizione di ferri d'armatura, oltre a favorire, nei particolari costruttivi, di un metodo ottimale per lo smaltimento delle acque.

L'eventuale scelta di materiali che contengono al loro interno sostanze indesiderate, o l'inadeguata attenzione alle diverse fasi di lavorazione del calcestruzzo, possono produrre:

- Problematiche che possono essere riscontrate durante la realizzazione dell'opera, nel caso ci si trovasse, per esempio, di fronte a una miscela di calcestruzzo, la quale richieda l'ausilio di acceleranti o ritardanti chimici per l'idratazione del cemento incluso al suo interno;
- Problematiche dovute all'eccessiva aria incamerata all'interno del calcestruzzo, che porta a irrimediabili perdite prestazionali della miscela, ma anche a una perdita della qualità estetica una volta ultimata l'opera, per via dell'insediamento di sostanze inquinanti che portano alla deturpazione delle facciate dei getti di calcestruzzo;
- Problematiche che provocano un degrado prematuro del calcestruzzo e/o la corrosione precoce delle barre d'armatura, il che porta a dover eseguire interventi sull'opera di tipo straordinario prima che essa raggiunga la sua vita utile preventivata in fase progettuale.

Per le motivazioni sopra esposte è opportuno ribadire il concetto dell'importanza che deve essere data alla scelta dei componenti, per creare una miscela idonea a una determinata opera. Nervi affermava che «per il cemento armato l'elemento base, il conglomerato, è tanto variabile e mutevole quanto possono esserlo gli individui di una stessa specie vivente». La risposta meccanica di un calcestruzzo dipende dalla qualità e granulometria degli inerti, dal rapporto acqua/cemento, dalle modalità usate nell'impasto e nel getto, dalle condizioni ambientali di maturazione, dalla presenza di eventuali additivi, dalle caratteristiche dello stesso cemento (mix design). Pertanto, ai fini della qualità del risultato finale in termini di sicurezza, la progettazione della miscela assume un peso quasi equivalente a quello della vera e propria progettazione strutturale, oltre ad

essere di fondamentale importanza al fine di evitare la comparsa di alterazioni durante la vita nominale del manufatto.

3.1 CEMENTO

Il cemento, ad oggi, viene considerato il legante idraulico più utilizzato al mondo, ma nello specifico quello di cui si fa più uso è il cemento Portland, brevettato nel 1824.

Questa tipologia di legante idraulico si ottiene miscelando rocce di origine calcarea, rocce di origine argillosa e ceneri di pirite, le quali vengono cotte in forni rotanti a temperature superiori ai 1000°C; una volta passata la fase di cottura, le materie prime subiscono un processo di macinazione e il prodotto che si ottiene viene definito clinker (*Figura 4*).

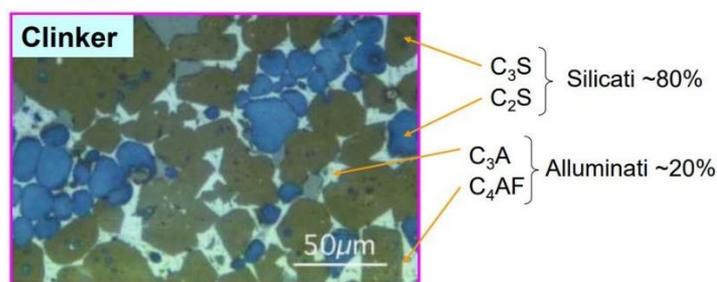


Figura 4 - Clinker di cemento Portland

(Fonte: Università degli studi di Bologna)

Il clinker di cemento portland è costituito da quattro elementi mineralogici principali, due alluminati presenti circa al 20%, C3A e C4AF, principali responsabili del fenomeno della presa e, per l'80% due silicati, C3S e C2S, responsabili dell'indurimento. Il ruolo di maggiore importanza è rivestito dai silicati, in quanto tramite essi si ottengono le prestazioni meccaniche del composto indurito (alle quali non contribuiscono gli alluminati).

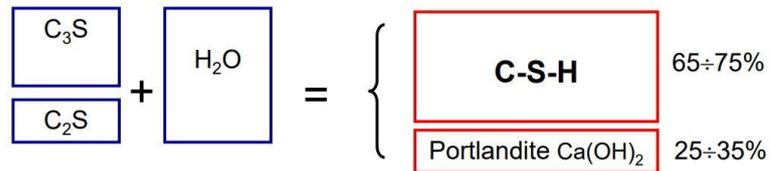
Esistono svariate tipologie di cemento Portland, le quali si differenziano le une dalle altre attraverso la concentrazione dei minerali contenenti calcio e la matrice cementizia si forma tramite l'aggiunta di acqua alla polvere di cemento; questo è definito "processo di idratazione", ovvero il processo che fa indurire il cemento, creando il legame chimico tra la matrice e le particelle attraverso processi reattivi e diffusivi, non isotermi. Dunque, a seguito di questi processi, si crea un volume di prodotto idrato che va a consolidarsi in maniera progressiva attraverso i processi di presa e indurimenti spiegati di seguito.

Nello specifico abbiamo due processi di idratazione, il primo è l'idratazione degli

alluminati, nonostante essi siano presenti in percentuali nettamente inferiori ai silicati (1-13%); questa reazione è di per sé già molto veloce, ma se posta a contatto con la calce, come nel caso del cemento, essa subisce un'ulteriore accelerazione. L'accelerazione che subisce questa reazione è da tenere controllata, in quanto un'accelerazione troppo sostenuta va a creare l'impossibilità di usare il clinker di cemento Portland per la realizzazione di calcestruzzi e malte. Dunque, per evitare che questo processo risulti essere eccessivamente veloce, si va a introdurre nel clinker il gesso, così da evitare il fenomeno di una presa troppo rapida. La reazione di idratazione degli alluminati subisce in questo modo un forte rallentamento, dovuto alla maturazione di un sale quaternario, a tutti conosciuto come ettringite; quest'ultima ricopre un ruolo essenziale nel processo di presa e nel breve periodo, appena dopo qualche giorno, risulta essere presente già in quantità minima nel composto, sottoforma di micro-cristalli con struttura ad ago.



La reazione di idratazione dei silicati invece può essere sintetizzata come:



La reazione sopra riportata deve essere assunta come indicativa, in quanto risulta difficoltoso stimare le corrette percentuali della composizione del C-S-H (nello specifico i rapporti C/S e S/H), ovvero la quantità di idrossido di calcio che viene prodotto dal processo di idratazione, il quale porta al processo di indurimento. Come linea indicativa si tende ad assumere, se la pasta cementizia è ben idratata, il C-S-H intorno al 65-75%, mentre l'idrossido di calcio intorno al 25-35%.

I cementi che però ad oggi sono più commercializzati sono realizzati da miscele di clinker di cemento Portland e aggiunte: queste aggiunte possono essere presenti in differenti percentuali, le quali variano dall'8% al 95%, in particolare possono essere materiali pozzolanici (pozzolane naturali, ceneri volanti, fumo di silice, ecc.), materiali pozzolanici caratterizzati da un comportamento di tipo idraulico (loppe d'altoforno), oppure degli inerti.

La produzione dei cementi è basata su requisiti compositivi, prestazionali e

produttivi determinati dalla norma EN 197-1 (Tabella 2).

Tipo di cemento	Denominazione	Sigla	Clinker	Loppa d'altoforno granulata	Microsilice	Pozzolana		Cenere volante		Scisto calcinato	Calcare	Costituenti secondari
			K	S	D	naturale P	industriale Q	silicica V	calcica W	T	L	
I	Cemento Portland	I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
II	Cemento Portland alla loppa	II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland alla microsilice	II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland alla pozzolana	II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland alle ceneri volanti	II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
		II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	Cemento Portland allo scisto calcinato	II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
	Cemento Portland al calcare	II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Cemento Portland composito	II/A-M	80-94	-	-	-	-	-	6-20 (°)	-	-	-
II/B-M		65-79	-	-	-	-	-	21-35 (°)	-	-	-	
III	Cemento d'altoforno	III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	0-5
IV	Cemento pozzolanico	IV/A	65-89	-	-	-	11-35	-	-	-	0-5	
		IV/B	45-64	-	-	-	36-55	-	-	-	0-5	
V	Cemento composito	V/A	40-64	18-30	-	-	18-30	-	-	-	0-5	
		V/B	20-39	31-50	-	-	31-50	-	-	-	0-5	

Tabella 2 - Tipologie di cemento

(Fonte: UNI EN 197-1)

Come si evince dalla tabella i cementi vengono suddivisi in cinque categorie (I, II, III, IV, V) in base alla tipologia e alla percentuale impiegata nella miscela dei costituenti scelti:

Le cinque macrocategorie sono composte da:

- **CEM I: Cemento Portland:** Questa tipologia è costituita per il 95% da clinker di cemento Portland e da una parte nettamente inferiore di costituenti che variano dallo 0% al 5%. Sono maggiormente utilizzati nella realizzazione di elementi prefabbricati in calcestruzzo armato semplice o precompresso.
- **CEM II: Cemento Portland composito:** il costituente presente con la percentuale maggiore è il clinker di cemento Portland, presente dal 65% al 94%, al quale vengono fatte aggiunte minerali, come loppe granulate d'altoforno, microsilice, pozzolane, ceneri volanti, scisto calcinato, calcare. Hanno caratteristiche molto simili ai cementi di tipo I, dunque risultano essere anch'essi idonei alla realizzazione di elementi prefabbricati in calcestruzzo armato semplice o precompresso.
- **CEM III: Cemento d'altoforno:** questo tipo di cemento è caratterizzato dal

fatto di essere costituito esclusivamente da clinker di cemento Portland, in una percentuale che può variare fino al 64% e dalla loppa granulata basica d'altoforno. Questa categoria di cementi presenta al suo interno tre sottocategorie (A, B, C), le quali indicano il contenuto di loppa presente nel cemento, rispettivamente negli intervalli 36%-65%, 66%-80% e 81%/95%. I CEM III sono utilizzati principalmente quando ci si trova a progettare in un ambiente in cui il calcestruzzo risulta essere soggetto ad aggressioni di tipo chimico, o per la realizzazione di opere di grandi dimensioni.

- **CEM IV: Cemento pozzolanico:** Risulta essere costituito da una miscela clinker di cemento portland e materiale pozzolanico naturale o artificiale. Al variare della percentuale di materiale pozzolanico, dall'11% al 55%, questa categoria si suddivide in due sottogruppi (A e B). I CEM IV sono caratterizzati da un'elevata resistenza agli attacchi di tipo chimico.
- **CEM V: Cemento composito:** da non confondere con il CEM II, perché in questa casistica i cementi compositi sono realizzati con una miscela di clinker di cemento Portland, loppe d'altoforno e pozzolane, risultando idonei alla realizzazione di calcestruzzi che possono essere utilizzati in ambienti mediamente aggressivi, come zone marittime, acque acide, ecc.

3.1.1 Forme di alterazione o degrado dovuti al cemento

La selezione, in fase progettuale, della tipologia e della classe cementizia può influire sulla durabilità dell'opera che si sta pianificando. Un esempio può essere un manufatto destinato a essere realizzato in un ambiente marino o a contatto con sali disgelanti a base di cloruro: la durabilità del manufatto è direttamente proporzionale alla porosità della miscela finale, ovvero è proporzionale al rapporto acqua/cemento. Da ciò si evince che quanto è più piccolo il rapporto appena citato, maggiori saranno le tempistiche con le quali si attiverà il fenomeno di corrosione dei ferri d'armatura dovuto ai cloruri, a parità di spessore del copriferro. Le tempistiche possono allungarsi qualora si scelga di adottare, previo confezionamento della miscela, cementi pozzolanici o cementi d'altoforno che consentono il rallentamento della diffusione di cloruri nella pasta cementizia. Dunque, in questi casi, la scelta di un eventuale cemento Portland o Portland di miscela è considerato un errore, in quanto spergiura la durabilità dell'opera poiché questi cementi non garantiscono protezione dall'attacco dalla penetrazione di cloruri.



Figura 5 - Errore nella scelta del cemento

(Fonte: “Il restauro dell’architettura moderna in cemento armato” – L.Coppola, A.Buoso)

3.2 AGGREGATI

Gli aggregati sono sostanze minerali con particelle di dimensioni e forme adatte alla produzione di calcestruzzo secondo la UNI EN 206-1. Nei calcestruzzi e nelle malte occupano una frazione rilevante di volume; l’aumento del contenuto di aggregati consente di ridurre la quantità della pasta cementizia.

Nello specifico gli aggregati svolgono le seguenti funzioni:

- Rappresentano l’ossatura, lo scheletro del calcestruzzo, il che va a favorire le caratteristiche di tipo meccanico della miscela;
- Data la quantità che ne va utilizzata e il loro volume, questo fa sì che possa essere ridotta la quantità di legante idraulico da utilizzare, in modo tale da avere una riduzione del calore di idratazione e una riduzione della possibile tendenza alla creazione di fessurazioni;
- Riducono il ritiro della pasta, dato il loro elevato modulo elastico.

Gli aggregati che vengono impiegati per il confezionamento del calcestruzzo possono essere suddivisi in diverse categorie, che si basano sulla loro provenienza; infatti, si possono trovare aggregati di derivazione naturale (*Figura 6*), sui quali non si deve intervenire nel modificare la loro struttura o la loro composizione originale, i quali abitualmente provengono da cave naturali, poi soggetti a frantumazione, oppure da corsi fluviali, o depositi marini. Queste ultime due tipologie di aggregati sono generalmente caratterizzate da elementi lapidei che si contraddistinguono per la loro forma tondeggianti e per la loro superficie liscia.

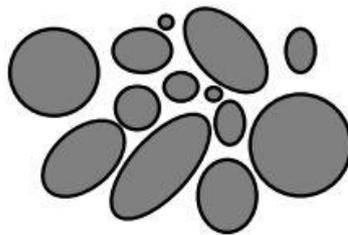


Figura 6 - Aggregati di derivazione naturale

(Fonte: Università degli studi di Bologna)

Ma si può avere a che fare anche con aggregati di derivazione artificiale (Figura 7), ottenuti da processazioni artificiali di materie prime organiche o inorganiche, spesso di forma molto irregolare e che presentano spigoli vivi.



Figura 7 - Aggregati di derivazione artificiale

(Fonte: Università degli studi di Bologna)

Esiste anche una terza e ultima categoria di aggregati, ovvero quelli ottenuti da processazioni di riciclo di materiali edili, precedentemente accuratamente scelti e successivamente frantumati in vista del loro riutilizzo. Questi sono caratterizzati dal fatto che la normativa ne fornisce un utilizzo limitato, in funzione della loro provenienza e della loro destinazione d'uso.

È bene evidenziare come la normativa fornisca procedure per valutare determinate proprietà che devono avere gli aggregati, come l'indice di forma e l'indice di appiattimento, ma senza riportare limiti o restrizioni a queste ultime.

Oltre alla loro provenienza, gli aggregati possono essere classificati anche in base alla loro massa volumica, ovvero rispetto al loro grado di saturazione e alla loro umidità. La massa volumica è identificata come il rapporto tra massa e volume occupato dagli aggregati, ovviamente andando a contemplare anche i vuoti che si andranno conseguentemente a creare. La classificazione di un aggregato in base alla sua massa volumica va a influenzare le caratteristiche meccaniche di un calcestruzzo, in quanto se questo rapporto risulta essere molto basso si va a riscontrare una scarsa resistenza a compressione della miscela, data da una spropositata presenza di vuoti. Le direttive date dalla Normativa Europea attualmente vigente impongono l'utilizzo di aggregati aventi

una massa volumica pari a 2300 kg/m^3 , per la realizzazione di un calcestruzzo considerato di tipo ordinario, in modo da adempiere ai requisiti minimi di resistenza a compressione.

L'assortimento degli aggregati e le dimensioni massime delle particelle degli aggregati è fondamentale ai fini della realizzazione del cls. Gli aggregati disponibili, dei quali si dovrà misurare la distribuzione granulometrica, **devono essere combinati in opportune proporzioni** allo scopo di ottenere una distribuzione adeguata a garantire le proprietà richieste al cls soprattutto in relazione alla lavorabilità e alle tecnologie di pompaggio.. Studiare la granulometria del sedimento vuol dire determinare la dimensione delle particelle dalle quali è composto e classificarle. L'analisi granulometrica viene effettuata per separazione meccanica, tramite l'ausilio di un'apposita batteria di setacci scelti tramite stima visiva della granulometria del campione, con dimensioni delle maglie che diminuiscono verso il basso (*Figura 8*).

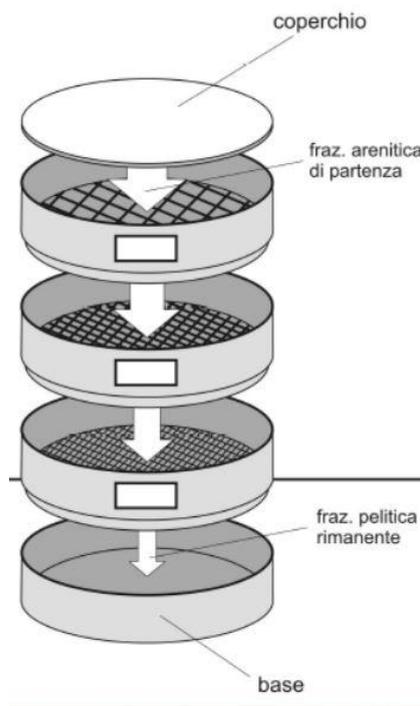


Figura 8 - Batteria di setacci per analisi granulometrica

(Fonte: Ispra)

In questo modo si ottiene il peso di ogni singola frazione granulometrica, il che consente di calcolare il materiale che passa per ogni setaccio e così facendo risulta possibile costruire la curva granulometrica del campione (UNI EN 933-1), ovvero la visione grafica del materiale passante in funzione dell'apertura del vaglio.

La distribuzione granulometrica risulta dunque avere un'importanza fondamentale, in quanto se si dispone di un buon assortimento degli aggregati questo va a migliorare diversi aspetti del calcestruzzo che si andrà a creare; infatti, se si ha un buon

assortimento i grani più fini si andranno a posizionare nei vuoti interstiziali formati dal posizionamento degli aggregati con un volume maggiore, assicurando un buon grado di densità alla miscela finale. Aumentare anche la percentuale di aggregati con diametro “grande” porta alla diminuzione della richiesta dell’acqua d’impasto, così da ottenere una miscela finale che presenta caratteristiche meccaniche migliori.

Nella definizione della distribuzione granulometrica si possono considerare i seguenti obiettivi:

- Portare al volume minimo dei vuoti fra le particelle (max densità in modo da minimizzare la richiesta di pasta);
- Garantire al massimo lavorabilità del cls fresco;
- Contrastare la segregazione dell’impasto.

Purtroppo le condizioni di massima densità non corrispondono a quelle di max scorrevolezza delle particelle pertanto si pone il problema di ottenere un compromesso ottimale fra le varie esigenze. Lo scopo è quello di utilizzare sfere di dimensioni diverse che vanno a riempire i vuoti presenti tra le particelle di dimensioni maggiori. Va specificato che non esiste una curva granulometrica standard per stabilire l’assortimento degli aggregati da usare per un determinato calcestruzzo; in letteratura sono presenti diverse opzioni e si va a scegliere quella più adatta al calcestruzzo che si vuole creare e per la struttura al quale è destinato.

3.2.1 Forme di alterazione o degrado dovuti agli aggregati

Sono molte le possibili alterazioni o i possibili degradi connessi all’impiego di aggregati non conformi all’impiego in un calcestruzzo.

In primo luogo, come già precedentemente spiegato, è bene avere un buon assortimento granulometrico, avendo un giusto mix tra aggregati fini e aggregati grossi, che risultino compatibili alla geometria della struttura che si va a progettare, in quanto una scadente distribuzione granulometrica potrebbe portare alla formazione di nidi di ghiaia (*Figura 9*) e alla formazione di un numero eccessivo di vuoti d’aria durante la posa in opera del calcestruzzo. È bene anche fare una scelta idonea degli aggregati grossi, oltre quelli fini, in quanto a loro si deve il merito della riduzione del ritiro igrometrico che soffre il calcestruzzo.

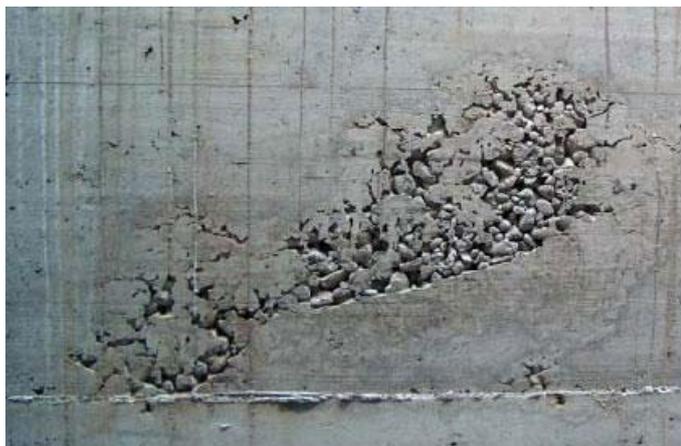


Figura 9 - Formazione nidi di ghiaia nel calcestruzzo

(Fonte: NetConcrete.info)

Nell'utilizzo di aggregati è bene porre particolare attenzione all'eventuale presenza di impurezze di natura organica, le quali vanno in contrasto con l'idratazione del cemento e ne rallentano il processo. La presenza di questa tipologia di sostanze risulta particolarmente dannosa nella stagione invernale, in quanto il processo di idratazione, di per sé già lento per via delle temperature rigide, viene ulteriormente rallentato dalla presenza di queste sostanze, andando a creare un degrado precoce del calcestruzzo dovuto alla formazione di ghiaccio.

Viene dunque fissato un limite riferito a quante sostanze organiche possono essere presenti negli aggregati destinati alla produzione di calcestruzzo per strutture facciavista, che varia dal 0,25% per aggregati di pezzatura grossa, fino al 0,05% per aggregati di pezzatura fine.

Bisogna porre attenzione anche ai minerali che compongono gli aggregati, in quanto, in certi casi, alcuni minerali in presenza d'acqua reagiscono con la pasta cementizia, provocando degrado nel calcestruzzo, come nel caso di aggregati contenenti un alto tasso di solfati o di cloruri, i quali non creano degrado del calcestruzzo, ma causano la corrosione delle barre d'armatura. Si presenta nello specifico il degrado del calcestruzzo dovuto a sostanze inquinanti presenti negli aggregati:

- Aggregati contenenti cloruri: la presenza di cloruri è fortemente dannosa in quanto va a innescare la corrosione delle barre d'armatura. Gli inerti che contengono cloruri sono principalmente gli inerti naturali derivanti da dragaggio marino, ma i cloruri possono essere eliminati tramite apposite operazioni di lavaggio così come prescritto dalla UNI EN 1744-1.
- Aggregati contenenti solfati: gli aggregati contenenti del gesso possono causare la formazione di fessure nel calcestruzzo, a differenza del gesso contenuto nel

cemento che è essenziale. È essenziale controllare che ci sia la totale assenza di sostanze solfatiche granulometricamente importanti, in quanto eccessivamente dannose, poiché, ad oggi, non esistono metodi per contrastare gli effetti di questi minerali.

- **Aggregati contenenti silice alcali-reattiva:** le forme particolarmente dannose per un calcestruzzo sono quelle mal cristallizzate, denominate amorfe, in quanto risultano particolarmente attive nei riguardi degli alcali che si trovano nel cemento. Quel che succede visibilmente al calcestruzzo è la formazione di fessurazioni, con successiva espulsione di malta, effetto molto pericoloso, perché come reazione si manifesta in periodi molto lunghi dopo la messa in opera del calcestruzzo, causando conseguenze estremamente dannose sulla sicurezza dell'opera. Anche questo fenomeno, come il precedente, non si riesce a diagnosticare preventivamente, dunque è prassi usare cementi pozzolanici, d'altoforno o ceneri volanti, in grado di impedire che la reazione avvenga. I requisiti che deve possedere l'aggregato sono elencati nella UNI EN 932-3, in cui viene descritto l'esame petrografico a cui deve essere sottoposto e la UNI EN 8520-22 la quale prescrive una prova di espansione su provini di malta nel breve e lungo termine.

3.3 ACQUA D'IMPASTO

Insieme a cemento e aggregati, l'acqua è uno dei principali ingredienti nel processo di produzione di un calcestruzzo. Bisogna porre però molta attenzione nell'uso di questo componente, in quanto una sua errata quantità può portare al confezionamento di un calcestruzzo che presenta scadenti proprietà sia dal punto di vista meccanico che di durabilità. In realtà ciò che inficia tali proprietà non è la quantità di acqua utilizzata, bensì un eccessivo rapporto tra quantità d'acqua utilizzata e quantità di cemento; dunque si può aumentare la quantità d'acqua per rendere più lavorabile l'impasto ma di conseguenza bisogna aumentare proporzionalmente anche la quantità di cemento, così da avere un buon rapporto acqua/cemento.

Importante è anche la provenienza dell'acqua, la quale deve rispettare i requisiti imposti dalla norma EN 1008, in quanto una possibile scelta sbagliata dell'acqua da aggiungere alla miscela può portare a problemi di accelerazione o ritardo del tempo di presa e indurimento del calcestruzzo, o a un precoce degrado delle strutture in calcestruzzo armato. La norma vigente appena citata vieta l'utilizzo di acque nere per il confezionamento di calcestruzzi e, tranne che per le acque potabili (difficilmente

utilizzate a causa del costo elevato), per le restanti vige l'obbligo di verificarne l'idoneità prima dell'impiego, tramite analisi di tipo chimico finalizzate a valutare la presenza o meno di sostanze non idonee. Nello specifico la normativa pone valori massimi di sostanze non idonee presenti nelle acque.

Sostanze contenute nell'acqua	Contenuto massimo ammissibile da normativa [mg/l]	Effetti rilevabili sul calcestruzzo
Cloruri	1000 per opere in C.A. 500 per opere in C.A.P.	Corrosione dei ferri d'armatura
Solfati	2000	Maturazione di gesso ed ettringite con espansione e fessurazione del calcestruzzo
Alcali	1500	Reazione alcali-aggregati che causa la fessurazione del calcestruzzo
Nitrati	500	Accelerazioni tempi di presa e indurimento e perdita di lavorabilità del calcestruzzo
Fosfati	100	Rallentamento dell'idratazione del cemento, maggiori i tempi di presa e indurimento, allungamento dei tempi di disarmo dei manufatti
Zuccheri	100	
Piombo	100	
Zinco	100	

Tabella 3 - Valori massimi di sostanze non idonee consentiti da normativa

3.3.1 Forme di alterazione o degrado dovuti all'acqua di impasto

Gli effetti indesiderati dovuti all'acqua d'impasto sono praticamente nulli, sia dalla parte estetica che dalla parte funzionale. All'acqua d'impasto si può dare solo una responsabilità, anche se indiretta, nel caso in cui si faccia uso di acqua di riciclo che presenta un'eccessiva quantità di materiale fine in sospensione. Questa eccessiva quantità di materiale fine in sospensione va a ridurre la lavorabilità dell'impasto durante la fase di trasporto dalla centrale al cantiere. Questa problematica può essere contrastata andando a compensare il dosaggio dei fini dell'intera miscela, ma se questo non avvenisse il problema potrebbe dilagare in un'erronea aggiunta di acqua in cantiere, per via della scarsa lavorabilità dell'impasto, con l'esito di una diminuzione della resistenza del calcestruzzo e con un'accentuazione del fenomeno di segregazione.

Fatta eccezione per la casistica appena esposta, l'acqua d'impasto non è da considerarsi un elemento che potrebbe portare rischio di degrado o alterazione al calcestruzzo e alle barre d'armatura.

3.4 ADDITIVI

I progressi maggiori riscontrati negli ultimi trent'anni nel mix design dei calcestruzzi sono dovuti principalmente agli additivi. Gli additivi per calcestruzzo sono sostanze chimiche di natura prevalentemente organica (generalmente impiegati in forma liquida) aggiunte durante il procedimento di miscelazione del cls col fine di apportare migliorie in termini prestazionali e benefici dal punto di vista economico, che non sarebbero possibili tramite una variazione di dosaggi degli altri componenti costituenti il calcestruzzo. Hanno trovato largo impiego a partire dagli anni '90 con lo scopo di modificare e migliorare le proprietà della miscela di calcestruzzo allo stato fresco e/o indurito e nella moderna tecnologia del calcestruzzo questi prodotti, nell'ultimo ventennio, hanno assunto un ruolo di primaria importanza tanto che, ormai, possono ritenersi un ingrediente utilizzato di routine nella produzione del conglomerato cementizio.

Gli additivi per calcestruzzo vengono classificati, in accordo con la norma *UNI-EN 934-2* che ne definisce anche i requisiti minimi, in base alla funzione principale che essi svolgono quando vengono introdotti nell'impasto, in base al tipo di struttura ai quali sono destinati e a secondo del periodo in cui sarà effettuato il getto.

Superfluidificanti o riduttori di acqua (fluidificanti). Sono additivi che permettono di ridurre il contenuto di acqua di una data miscela di cls senza influenzare la consistenza oppure che ne aumentano la lavorabilità senza influenzare il contenuto di acqua oppure che producono entrambi gli effetti simultaneamente. Si differenziano per l'efficacia: secondo la norma con un riduttore di acqua si deve poter ridurre la quantità di acqua di una miscela di controllo almeno del 5%, mentre con un superfluidificante la diminuzione deve essere almeno del 12%. Si tratta di sostanze polimeriche che si disciolgono in acqua ed esercitano un'azione disperdente sui grani di cemento. I prodotti tradizionali sono stati ottenuti dalla polimerizzazione della naftalina, della malammina. In particolare queste macromolecole, costituite dalla catena principale del polimero e da gruppi solfonici laterali PNS (caricati negativamente), si adsorbono sulla superficie dei grani di cemento ed esercitano un'azione repulsiva fra le diverse particelle, impedendone così l'avvicinamento. Questo fa sì che le particelle non coagulino in grumi (flocculi) ma si disperdono nella matrice.

A seconda delle esigenze, i superfluidificanti possono essere impiegati per:

1) garantire **una riduzione di acqua** (minore a/c, minore porosità, migliore durabilità e maggiore Rck);

2) consentire di migliorare e prolungare nel tempo la **lavorabilità** (a parità di a/c e di resistenza meccanica);

3) aumentare la frazione di **inerte** (riducendo il rapporto a/c, garantendo un minor ritiro igrometrico, minore deformazione viscosa e minore gradiente termica).

L'efficacia dell'additivo dipende dal dosaggio e questo viene in genere consigliato dal produttore dell'additivo stesso in funzione dell'azione richiesta, in genere varia tra 0,5% e 1,5% in massa rispetto al cemento.

Aeranti (Air-Entraining Agents, AEA). Sono aggiunti per conferire al cls resistenza ai cicli gelo-disgelo. Sono additivi costituiti da sostanze sia di origine naturale sia di sintesi che possiedono caratteristiche tensioattive in quanto modificano la tensione superficiale dell'acqua. Aggiunti all'impasto in tenori molto bassi (dosaggi di 0,02-0,06% sul cemento), consentono la **formazione e l'inglobamento** nella pasta cementizia di **bolle d'aria** (diametro 100-300 μm , spacing ottimale) che fungono da valvola di sfogo per le pressioni dell'acqua contenute nel poro (evitando pressioni sulle pareti dello stesso che porterebbero alla formazione di fessure). L'azione collaterale dell'impiego di areanti riguarda la riduzione di resistenza meccanica: per ogni punto

percentuale di aria introdotta la resistenza meccanica a compressione si riduce del 5% rispetto ad un uguale cls senza aria inglobata. Con utilizzo di areante pari allo 0,02-0,06 % mediamente si introduce il 4% aria inglobata con una riduzione della resistenza del 20%. D'altro canto, l'additivo areante ha l'effetto positivo di aumentare (anche se di poco) la fluidità dell'impasto, questo ha come conseguenza il fatto di poter ridurre la quantità di acqua di impasto in funzione della percentuale di aria inglobata (con il 4% di aria inglobata posso ridurre di 20 Kg/m³ l'acqua di impasto). Per via delle bassissime percentuali di dosaggio, in commercio si trovano gli areanti in accoppiata con il superfluidificante in modo tale da avere un dosaggio consigliato in grado da sortire un duplice effetto: conferisco resistenza ai cicli gelo-disgelo (verificabile attraverso la massa sgretolata dopo n cicli) e, grazie al superfluidificante, recupero la quota parte di resistenza meccanica persa.

Acceleranti o ritardanti di presa e indurimento. Il comportamento a breve del cls può essere modificato con additivi che modificano i tempi di presa oppure che modificano la velocità di indurimento iniziale oppure che agiscono su entrambe le fasi. Entrambi hanno la funzione di **modificare il grado di idratazione α del cemento alle brevi stagionature**. In passato venivano usati come additivi cloruri di calcio ma oggi, poiché l'impiego di tali sostanze è vietato per il rischio di innescare la corrosione sulle armature, si utilizzano additivi a base di Silicato o Alluminato o Carbonato di sodio

oppure Solfato di ferro o di alluminio (*alkali-free*). Sono utilizzati per ritardare o accelerare la presa oppure per accelerare l'indurimento).

Idrofobizzanti. Questi additivi hanno quindi la funzione di impedire l'assorbimento capillare del cls o di ridurre il contenuto di acqua nelle strutture a contatto con l'umidità favorendo la sua espulsione sotto forma di vapore. Le resine non sono adatte per questi scopi poiché non consentono la fuoriuscita di acqua che rimarrebbe bloccata all'interno dei pori (a causa delle grandi dimensioni della molecola) ma viene preferito l'impiego di silani e silossani. Si tratta di polimeri a base di silicio le cui molecole riescono a **rendere la superficie idrofoba** e fissandosi sulle particelle di cemento idrato. Il trattamento idrofobico consente di aumentare l'angolo $\theta > 90^\circ$, la gocciolina di acqua viene respinta perché viene reso idrofobico il solido che prima era idrofilico. Gli idrofobizzanti vanno applicati mediante stesura su superfici preventivamente bagnate e l'efficacia dura dai 5 ai 10 anni.

Additivi modificatori di viscosità. Sono bio-polimeri (a base di polimeri naturali, spesso costituiti da cellulosa modificata), in genere utilizzati per i cls autocompattanti. Hanno la funzione di **migliorare la coesione** e la fluidità del cls fresco e ridurre la sua tendenza alla segregazione (separazione degli inerti) e al bleeding (acqua di risalita in superficie o sotto l'aggregato o l'armatura). Possibile alterazione o degrado dovuta agli additivi

3.4.1 Forme di alterazione dovute agli additivi

Le forme di alterazione del calcestruzzo dovute agli additivi sono principalmente di tipo estetico e superficiale, riconducibili, nello specifico, all'uso di additivi superfluidificanti. Si manifestano con la presenza di bolle (*Figura 10*), in quanto, questo additivo a base di polimeri, come effetto secondario genera l'intrappolamento di aria durante la miscelazione degli ingredienti del calcestruzzo. Queste manifestazioni dilagano maggiormente in calcestruzzi con un rapporto acqua/cemento basso, in quanto l'impasto risulterà essere più viscoso e, di conseguenza, diventa più difficile eliminare l'aria intrappolata tramite la vibrazione.



Figura 10- Alterazione del calcestruzzo dovuta all'uso di additivo superfluidificante

(Fonte: 123RF)

Nelle opere di vecchia costruzione è stata notata una seconda tipologia di degrado che consiste nella corrosione delle barre d'armatura dovuta all'uso di additivi antigelo a base di cloruro di calcio (Figura 11), i quali venivano usati quando si gettava il calcestruzzo nel periodo invernale, poiché ne favorivano l'indurimento accelerando il processo.



Figura 11 - Corrosione delle barre d'armatura dovuta all'uso di additivi antigelo

3.5 AGGIUNTE

Le aggiunte sono, ad oggi, quotidianamente impiegate nella realizzazione di un calcestruzzo e sono principalmente materiali inorganici finemente suddivisi che vanno modificare certi aspetti reologici della miscela, come la resistenza alla segregazione per esempio. Esistono due tipologie di aggiunte, quelle del Tipo I, meglio conosciute come filler, e quelle del Tipo II, che sono le aggiunte pozzolaniche.

Nello specifico le aggiunte appartenenti al Tipo I comprendono prodotti finissimi ottenuti tramite frantumazione di rocce silicee o calcaree e il prodotto che si ottiene è

appunto denominato “filler”. La mansione principale del filler è quella di andare a correggere la granulometria degli aggregati, in assenza della frazione fine, così da avere un miglioramento in termini di pompabilità dell’impasto e per la produzione di calcestruzzi auto-compattanti.

Le aggiunte di Tipo II invece sono costituite da materiali che esplicano un’attività pozzolanica o che hanno delle proprietà idrauliche. Le pozzolane, infatti, non sono impiegate solo per la produzione di cementi, bensì vengono utilizzate anche in centrale di betonaggio per la realizzazione del calcestruzzo. Questa modalità di utilizzo è vantaggiosa in quanto può essere modulata la percentuale di dosaggio di queste aggiunte, in relazione alle prestazioni che si vogliono ottenere. Solitamente vengono utilizzate ceneri volanti e fumo di silice, le prime perché apportano miglioramenti in termini di lavorabilità dell’impasto e durabilità, soprattutto nel caso di strutture soggette all’esposizione di cloruri, solfati o acque dilavanti, mentre le seconde sono principalmente utilizzate per la produzione di calcestruzzi speciali, come calcestruzzi a elevata resistenza meccanica a compressione o quando il manufatto è destinato al contenimento di sostanze aggressive.

3.5.1 Forme di alterazione dovuti alle aggiunte

Come nel caso dell’acqua d’impasto, anche per le aggiunte non risultano esserci fenomeni di alterazione o degrado direttamente riconducibili a queste ultime ma va sottolineato che quando si fa uso di ceneri volanti inquinate da materiale incombusto in percentuali elevate queste possono portare alla formazione di macchie superficiali sul calcestruzzo. Per questa motivazione le ceneri volanti non vengono utilizzate nella realizzazione di strutture in calcestruzzo armato con calcestruzzo facciavista.

Allo stesso modo anche l’ausilio di loppe d’altoforno può causare alterazioni cromatiche del calcestruzzo, derivanti dall’ossidazione dei componenti solubili all’interno delle loppe.

3.6 BARRE D’ARMATURA

Il conglomerato cementizio armato funge da materiale da costruzione ed è costituito da:

- Calcestruzzo → materiale caratterizzato da una forte resistenza a compressione, ma con scarse qualità di resistenza a trazione;
- Acciaio → materiale caratterizzato da ottima resistenza a trazione.

Ad oggi una struttura in calcestruzzo armato può essere gettata in opera oppure realizzata in stabilimento.

Il cemento armato gettato in opera è quello maggiormente utilizzato grazie alle sue performance strutturali, ovvero genera delle ottime unioni travi/pilastro, ma anche grazie al fatto di risultare maggiormente vantaggioso dal punto di vista economico. La realizzazione in stabilimento, invece, garantisce di ovviare eventuali problematiche dovute alle condizioni climatiche, che non possono essere ovviate in situ, e determina un controllo ulteriore sulla qualità del conglomerato cementizio. Un esempio standard di elemento in calcestruzzo armato prodotto in stabilimento viene fornito dal calcestruzzo armato precompresso.

L'acciaio utilizzato per la realizzazione di strutture in cemento armato è composto da una lega di ferro e carbonio prodotta in forma di barre, rotoli o reti elettrosaldate. Nello specifico gli acciai utilizzati sono di tipo dolce, ovvero composti da una percentuale di carbonio molto piccola, pari circa lo 0,2% e durante la fase di produzione vengono aggiunte anche percentuali infime di manganese e silicio, per aumentare le caratteristiche di saldabilità.

L'acciaio impiegato nella realizzazione di strutture, prima di arrivare in cantiere, può essere saldato, presagomato (ferri piegati, staffe, ecc), o preassemblato formando elementi composti pronti ad essere utilizzati appena arrivati in loco. Queste operazioni possono essere fatte anche direttamente in cantiere, sotto l'osservazione attenta della Direzione Lavori, oppure possono essere realizzate in centri appositi di trasformazione.

È bene puntualizzare che gli acciai da costruzione devono essere ad aderenza migliorata, dotati, dunque, di nervature distribuite uniformemente per tutta la lunghezza delle barre, atte a incrementare l'aderenza di esse al calcestruzzo.

Le barre d'armatura sono contraddistinte dal diametro della barra tonda liscia equi passante, calcolato nell'ipotesi che la densità dell'acciaio sia $7,85 \text{ kg/dm}^3$, dovendo rispettare determinate restrizioni:

- Acciai B450C: diametro compreso tra i 6 mm e i 40 mm;
- Acciai B450A: diametro compreso tra i 5 mm e i 10 mm.

Capitolo 4

IL DEGRADO NELLE STRUTTURE IN C.A.

I fenomeni di alterazione e degrado che si presentano più frequentemente nelle strutture in generale e nelle strutture in calcestruzzo armato particolarmente, possono spesso essere ricollegati all'ambiente in cui esse sorgono. Infatti, le sostanze che vengono a contatto con le opere possono dar vita al degrado del calcestruzzo, ma allo stesso tempo anche al degrado dei ferri d'armatura, andando a intaccare la funzionalità e la durabilità dei manufatti in un tempo inferiore a quello previsto dalla vita nominale delle strutture in calcestruzzo armato.

Questi tipi di attacchi possono essere ulteriormente gravosi se, per esempio, in fase di progettazione non è stata data particolare attenzione alla realizzazione dei dettagli costruttivi, oppure se durante le procedure di esecuzione dell'opera stessa sono stati commessi errori, quali la scelta sbagliata di alcune componenti per la realizzazione del calcestruzzo, come spiegato nel precedente capitolo.

4.1 DURABILITÀ DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO

La durabilità del calcestruzzo armato è un argomento estremamente attuale, in quanto non risulta essere un problema scoperto recentemente, ma è stato spesso volutamente sottovalutato.

La durabilità di una struttura è la sua capacità di resistere a sollecitazione di qualsiasi genere, prodotte dal territorio circostante, senza che ne vengano alterate le funzionalità; in particolare per le strutture in calcestruzzo armato significa garantire, nell'arco della vita utile dell'opera, uno stato ottimale dal punto di vista della miscela e dal punto di vista dei ferri d'armatura. Una buona durabilità deve essere garantita anche da una frequente manutenzione dell'opera durante la sua vita.

Si percepisce, quindi, come la durabilità risulti essere un parametro che va progettato, così come vanno progettate resistenza meccanica e stabilità dei manufatti. In particolare, per la progettazione della durabilità si devono introdurre sollecitazioni

aggressive derivanti dall'ambiente in cui essa sorge; in questo caso la normativa europea è di aiuto, in quanto per ogni ambiente, condizionato da un determinato degrado, viene assegnata una classe d'esposizione. La norma cui riferirsi è la UNI EN 206-1, dove vengono elencate le varie classi di esposizione e il loro livello di gravità, in base alla tipologia del manufatto in esame e al degrado ad esso associato.

Classe di esposizione ambientale	Descrizione dell'ambiente di esposizione	Esempi di condizioni ambientali	UNI 9858	A/C massimo	Contenuto minimo di cemento kg/m ³	Rck minima N/mm ²	Contenuto minimo di aria %	Copriferro minimo Mm
1 Assenza di rischio di corrosione o attacco								
X0	Molto secco	Cls per interni di edifici con umidità dell'aria molto bassa	1	-		C12/15	-	15
2 Corrosione delle armature per effetto della carbonatazione								
XC1	Secco o permanentemente bagnato	Cls per interni di edifici con umidità relativa bassa o immerso in acqua	2a	0,65	260	C20/25	-	20
XC2	Bagnato, raramente secco	Superfici in cls a contatto con acqua per lungo tempo es. fondazioni	2a	0,60	280	C25/30	-	20
XC3	Umidità moderata	Cls per interni con umidità relativa moderata o alta e cls all'esterno protetto dalla pioggia	5a	0,55	280	C30/37	-	30
XC4	Ciclicamente bagnato ed asciutto	Superfici in cls a contatto con l'acqua, non nella classe XC2.	4a, 5b	0,50	300	C30/37	-	30
3 Corrosione delle armature per effetto dei cloruri esclusi quelli provenienti dall'acqua di mare								
XD1	Umidità moderata	Superfici in cls esposte a nebbia salina	5a	0,55	300*	C30/37	-	30
XD2	Bagnato, raramente asciutto	Piscine; cls esposto ad acque industriali contenenti cloruri	4a, 5b	0,55	300	C30/37	-	30
XD3	Ciclicamente bagnato ed asciutto	Parti di ponti esposte a spruzzi contenenti cloruri, pavimentazioni di parcheggi	5c	0,45	320	C35/45	-	40
4 Corrosione delle armature indotta da cloruri presenti nell'acqua di mare								
XS1	Esposto alla nebbia salina ma non all'acqua di mare	Strutture prossime o sulla costa	4a, 5b	0,50	300	C30/37	-	30
XS2	Permanentemente sommerso	Parti di strutture marine	5c	0,45	320	C35/45	-	40
XS3	Zone esposte alle onde o alla marea	Parti di strutture marine	5c	0,45	340	C35/45	-	40
5 Attacco dei cicli di gelo/disgelo con o senza sali disgelanti								
XF1	Moderata saturazione d'acqua in assenza di sali disgelanti	Superfici verticali in cls esposte alla pioggia e al gelo	2b	0,55	300	C30/37	-	30
XF2	Moderata saturazione d'acqua in presenza di sali disgelanti	Superfici verticali in cls di strutture stradali esposte al gelo e nebbia dei sali disgelanti	3, 4b	0,55	300	C25/30	4,0 e aggregati resistenti al gelo/disgelo	30
XF3	Elevata saturazione d'acqua in assenza di sali disgelanti	Superfici orizzontali in cls esposte alla pioggia e al gelo	2b	0,50	320	C30/37	4,0 e aggregati resistenti al gelo/disgelo	30
XF4	Elevata saturazione d'acqua in presenza di sali disgelanti o acqua di mare	Strade e impalcati da ponte esposti ai sali disgelanti. Superfici in cls esposte direttamente a nebbia contenente sali disgelanti	3, 4b	0,45	340	C30/37	4,0 e aggregati resistenti al gelo/disgelo	40
6 Attacco chimico								
XA1	Ambiente chimico debolmente aggressivo (vd. prospetto 2 della EN 206)	-	5a	0,55	300	C30/37	-	30
XA2	Ambiente chimico moderatamente aggressivo (vd. prospetto 2 della EN 206)	-	4 ^a , 5b	0,50	320 cemento resistente ai solfati	C30/37	-	30
XA3	Ambiente chimico fortemente aggressivo (vd. prospetto 2 della EN 206)	-	5c	0,45	360 cemento resistente ai solfati	C35/45	-	40

Tabella 4 - Classi di esposizione

(Fonte: UNI EN 206-1)

Come si può vedere in Tabella 4, le varie classi di esposizione sono a loro volta suddivise in sottocategorie numerate, in modo tale da definire più precisamente i requisiti necessari del calcestruzzo per il rispetto della classe al quale va associato. In questo caso la normativa ci sostiene ancora una volta attraverso la UNI 11104, un applicativo della UNI EN 206-1, fornendo per ogni classe d'esposizione il relativo: rapporto

acqua/cemento massimo, contenuto minimo di cemento, R_{ck} minima, percentuale di aria minima e minimo copriferro.

Bisogna fornire un'attenzione particolare anche alla definizione dello spessore del copriferro, tenendo in considerazione vari aspetti, quali l'aderenza tra acciaio e calcestruzzo, la classe di esposizione del calcestruzzo e la resistenza al fuoco della struttura, facendo riferimento alla norma UNI EN1992-1-1 "*Progettazione delle strutture di calcestruzzo: Regole generali e regole per gli edifici*". Un copriferro minimo deve essere garantito per assicurare la trasmissione delle forze di aderenza e per fornire un'adeguata protezione alle barre d'armatura contro i vari fenomeni di corrosione.

La durabilità risulta quindi essere a tutti gli effetti un parametro di progetto, per la corretta definizione della vita utile della struttura, ma anche per una corretta valutazione economica dell'opera, che non dipende esclusivamente dai costi di realizzazione di questa, ma anche di quelli di manutenzione. La poca importanza che in passato si riservava alle aggressioni ambientali risulta esser stata ulteriormente aggravata dalla quantità scarsa di guide di cui si disponeva per la scelta del calcestruzzo, ad oggi fortunatamente presenti.

Attualmente diversi studi affermano che le maggiori responsabilità del degrado delle strutture sono dovute alla scadente qualità del calcestruzzo, ma non risulta essere del tutto corretto. Bisogna prendere in considerazione anche possibili implicazioni di carattere strutturale, come la tipologia delle apparecchiature utilizzate per la costruzione dell'opera, deviazioni non preventivamente individuate tra modello teorico in fase di progettazione e comportamento reale delle strutture, oppure errori effettuati in fase di costruzione dei particolari costruttivi.

Aspetto ulteriormente importante è che, con il passare degli anni, si sono evolute molte metodologie, facendo sì che si andassero a progettare elementi strutturali di spessore sempre più limitato, senza andare a garantire un adeguato spessore del copriferro ed esponendo le strutture a rischi sempre maggiori di corrosione derivante dall'ambiente circostante. Altro aspetto che è andato a evolversi riguarda il campo degli acciai, i quali sono arrivati ad avere caratteristiche meccaniche sempre più elevate, che vanno, però, a incrementare il livello tensionale delle strutture durante la loro vita nominale, andando ad aumentare il rischio di fessurazione del calcestruzzo. Oltre agli acciai, è aumentato anche l'impiego di cementi con prestazioni meccaniche elevate, ma ciò è ottenuto tramite un rapporto acqua/cemento maggiore, che porta ad avere una matrice cementizia estremamente porosa, cui segue un'elevata facilità di penetrazione da parte di agenti aggressivi e successivo degrado del conglomerato cementizio. A ciò che è stato appena

citato si deve aggiungere la scarsa manutenzione, la quale ha portato le opere a un degrado precoce, che si poteva evitare andando a risparmiare ingenti cifre.

Dunque, si percepisce come non basti effettuare una corretta scelta del calcestruzzo per garantire una vita durevole alla struttura, ma si necessita di un approccio globale che analizza ognuno dei fattori sopracitati.

4.2 FORME RICORRENTI DI ALTERAZIONE E DEGRADO DEL C.A.²

Le manifestazioni di degrado hanno differenti cause. Eccezion fatta per le aggressioni biologiche, tutte siano esse imputabili a fattori chimici, fisici o meccanici, sono proporzionali alla porosità del conglomerato: più esso è poroso e maggiore sarà la probabilità che si verifichino problemi. Tenendo presente che la porosità del calcestruzzo è direttamente proporzionale all'acqua di impasto, si può affermare che più un conglomerato è poroso e minore sarà la sua resistenza. Questo spiega perché le opere in cemento armato con basse prestazioni meccaniche hanno generalmente una scarsa durabilità.

Indipendentemente dalle cause che li hanno prodotti, gli ammaloramenti si manifestano principalmente sotto forma di:

- Alterazione delle superfici
- Alterazioni delle sezioni
- Fessurazioni, perdita, distacco, ed espulsione del materiale

Il processo di deterioramento può coinvolgere singolarmente le varie componenti del c.a. ossia la matrice cementizia, gli aggregati e le armature

TIPOLOGIA DI DEGRADO	FORME RICORRENTI
Alterazioni delle superfici	<ul style="list-style-type: none"> - Macchie e alterazioni cromatiche - Perdita di boiaccia - Cavillature e fessurazioni diffuse - Macrobolle - Colonizzazioni biologiche - Efflorescenze e subflorescenze - Dilavamento superficiale - Deposito di particolare atmosferico - Distacco di intonaci, rivestimenti e pellicole pittoriche
Alterazioni della sezione	<ul style="list-style-type: none"> - Vespai e nidi di ghiaia - Riprese di getto
Fessurazioni, perdita, distacco ed espulsione di materiale	<ul style="list-style-type: none"> - Pop-out - Distacco dello strato corticale o di usura di pavimentazioni - Corrosione delle armature metalliche ed espulsione del copriferro

Tabella 5 - Tabella con le tipologie di degrado e relative manifestazioni

² (Buoso & Coppola, 2019)

4.2.1 Macchie e alterazioni cromatiche

Si tratta di alterazioni cromatiche in forma di macchie presenti sulle superfici verticali e quelle orizzontali che in fase di realizzazione dell'opera sono a contatto con casseri. Generalmente, nelle strutture orizzontali, le macchie interessano la superficie estradossale poiché la parte estradossale non entra in contatto con la cassaforma. Le macchie interessano in misura maggiore le strutture realizzate con casseri poco assorbenti come quelli in acciaio, in PVC rigido o in pannelli di legno multistrato. Soltanto in casi eccezionali le macchie possono interessare strutture in calcestruzzo facciavista realizzate con tavole di legno accostate. Nei casi in cui è previsto l'utilizzo di queste ultime, le alterazioni cromatiche più ricorrenti consistono nell'alternanza di superfici di colore chiaro e scuro che riproducono esattamente il disegno delle tavole utilizzate. Va sottolineato che con il passare del tempo la differenza cromatica delle superfici si attenua e pertanto, questo tipo di degrado si presenta più evidente nelle nuove costruzioni subito dopo la rimozione dei casseri. Le macchie e le alterazioni cromatiche interessano tutte le strutture in calcestruzzo la cui superficie, durante il getto, è a contatto con un cassero. Pertanto, questa tipologia di degrado interessa indistintamente sia le strutture esterne che quelle interne.

La presenza di macchie o di alterazioni cromatiche sulla superficie degli elementi in calcestruzzo è direttamente riconducibile alle seguenti cause:

- tracce di sporco, di terriccio, di polvere sulla superficie interna del cassero;
- presenza di acqua e/o ghiaccio sulla superficie interna del cassero;
- eccesso di disarmante non omogeneamente distribuito sulla superficie interna del cassero.

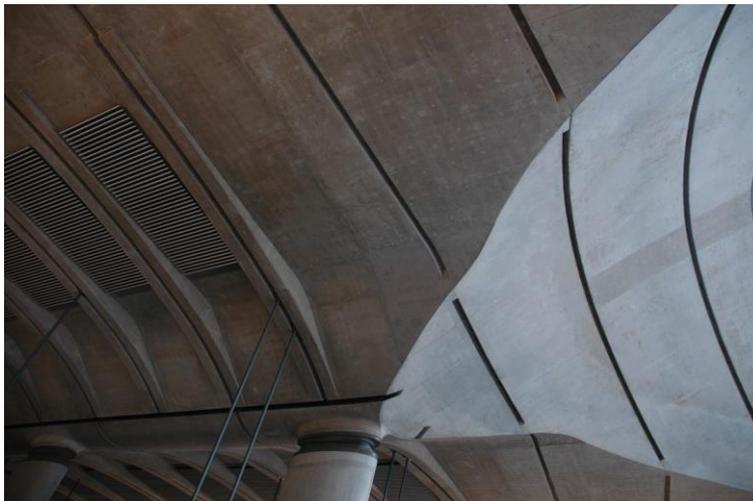


Figura 12 – Presenza di macchie sulla superficie in c.a.

(Fonte: Università degli studi di Bergamo, L.Coppola)

Nel caso di strutture facciavista, le alterazioni cromatiche sono da attribuire all'utilizzo di tavole in legni diversi oppure dello stesso legno, ma non utilizzate lo stesso numero di volte.

La presenza di macchie e di alterazioni cromatiche sulla superficie degli elementi in calcestruzzo rappresenta un mero problema di tipo estetico. Esse, infatti, non pregiudicano la durabilità, la statica e/o la funzionalità dell'opera.

In linea di massima l'eliminazione delle macchie e delle disuniformità cromatiche è di fatto impossibile senza alterare l'originale tessitura della superficie di un elemento in calcestruzzo ricorrendo ad una preliminare "pulitura" delle superfici e a una successiva eventuale applicazione di un rivestimento protettivo a basso spessore o di un trattamento idrorepellente incolore oppure pigmentato.

4.2.2 Perdita di boiaccia

Le perdite di boiaccia si rivelano durante la costruzione delle opere in calcestruzzo armato al momento della rimozione dei casseri e del disarmo delle strutture. Esse possono presentarsi in diverse forme la più ricorrente delle quali consiste in accumuli di pasta di cemento in corrispondenza delle zone basali il getto o dove sono presenti delle giunzioni nei casseri. Le perdite di boiaccia, inoltre, favorite da calcestruzzi molto fluidi e poco viscosi possono anche presentarsi in forma di striature soprattutto sulle superfici verticali degli elementi in c.a. Queste striature di colore più scuro rispetto alla colorazione delle zone non interessate dal difetto possono in qualche caso presentare delle "grinze". Nei casi più gravi, quando la perdita di boiaccia è rilevante, il degrado si presenta molto simile ad un vespaio con gli aggregati grossi non completamente avvolti dalla pasta di cemento

Le perdite di boiaccia interessano tutti i punti in cui vi è una giunzione dei casseri e le zone basali di elementi verticali.

La causa scatenante per la formazione di questi difetti è principalmente di carattere esecutivo. La non corretta giunzione dei pannelli, infatti, è la motivazione principale che conduce a questa alterazione delle superfici degli elementi in calcestruzzo. Tuttavia, il difetto può essere accentuato dall'utilizzo di calcestruzzi poveri di legante o laddove si è fatto ricorso per il loro confezionamento ad elevati quantitativi di acqua. Infatti, l'eccessiva fluidità della pasta di cemento accentua la tendenza della stessa a separarsi dal resto degli ingredienti favorendo, quindi, la perdita dell'acqua e delle parti fini laddove la giunzione dei casseri è mal eseguita.

La perdita di boiaccia rappresenta un danno meramente di carattere estetico ad eccezione di quelle situazioni ove l'eccessiva perdita di parti fini porta alla formazione di

zone "vespaiate" ove il problema è anche di tipo strutturale oltre che di durabilità per gli elementi in c.a. coinvolti. Particolarmente grave risulta questo difetto per gli elementi in c.a. facciavista.



Figura 13 - Fuoriuscita della boiaccia dalle casseforme non a contatto tra loro

(Fonte: NetConcrete.info)

Eventuali interventi di manutenzione si attuano soltanto per quelle strutture che debbono rimanere facciavista. Per gli accumuli di pasta di cemento in corrispondenza della ripresa di getto tra due elementi diversi si può intervenire con una rimozione meccanica della pasta di cemento in eccesso.

4.2.3 Cavillature e fessurazioni diffuse

Le cavillature e le fessurazioni in forma di carta geografica si manifestano nelle ore immediatamente successive al getto quando il calcestruzzo è ancora plastico e prima che lo stesso indurisca. Nelle strutture debolmente armate le cavillature non seguono un andamento geo-metrico regolare e sono contraddistinte da una modesta ampiezza che le rende scarsamente visibili. Esse possono essere evidenziate bagnando la superficie degli elementi in c.a. in quanto l'evaporazione di acqua avviene con maggiore lentezza dai cigli fessurativi evidenziandone la presenza. Generalmente la modesta ampiezza iniziale viene amplificata nel tempo per effetto della contrazione dimensionale dovuta al ritiro idraulico tipico dei conglomerati cementizi. Nelle strutture armate le cavillature presentano un andamento regolare che riproduce il disegno dei ferri di armatura. In questi casi, soprattutto se il calcestruzzo è particolarmente scadente, le fessurazioni presentano ampiezze rilevanti, superiori a cinque decimi di millimetro e, pertanto, sono direttamente visibili ad occhio nudo. In queste situazioni, inoltre, le fessurazioni sono accompagnate da una perdita di planarità delle superfici che si presentano concave per effetto dell'assestamento plastico conseguente all'eccesso di acqua evaporata verso l'esterno.

Tutte le strutture possono interessate dal problema delle cavillature superficiali. Tuttavia, sono le superfici libere, quelle non in contatto con il cassero (estradosso di un solaio o di una pavimentazione), che sono maggiormente affette da questo inconveniente.



Figura 14 -

La principale causa responsabile della comparsa delle cavillature risiede nella mancata protezione umida dei getti già nelle prime ore successive alla posa del conglomerato. Tuttavia, l'utilizzo di calcestruzzi confezionati con eccesso di acqua può favorire la

formazione delle lesioni accompagnate da una perdita di planarità.

In linea di massima, le cavillature da ritiro plastico rappresentano un mero problema di carattere estetico per le strutture. Le cavillature, infatti, oltre ad essere caratterizzate da un'ampiezza molto piccola (inferiore a 2-3 decimi di millimetro), risultano anche poco profonde e, pertanto, non pregiudizievoli per la durabilità dell'opera.

4.2.4 Macrobolle

Le macrobolle costituiscono dei difetti superficiali delle strutture in calcestruzzo che si presentano di forma circolare (di diametro variabile da pochi millimetri fino a circa 1-2 cm) o anche aciculare o a struttura allungata aventi profondità di pochi millimetri. Il calcestruzzo in prossimità di questi difetti si presenta perfettamente integro senza alcun segno di degrado o di sfarinamento superficiale del materiale. Rarissime sono anche le fessure che si dipartono dalla macrobolle. Questi difetti sono visibili sin dalla realizzazione della struttura al momento del disarmo dei casseri

Le macrobolle interessano principalmente le superfici laterali di travi, muri, setti e pilastri, realizzate mediante getto entro casseri costituiti prevalentemente da materiali "impermeabili" quali l'acciaio, i pannelli in legno multistrato, quelli in pvc rigido o in cartone con pellicola interna in polietilene: Raramente questi difetti si manifestano sulle superfici di elementi in calcestruzzo realizzati con casseri in tavole di legno assorbente come accade quando si vuole che la superficie presenti un facciavista che evidenzia la venatura del legno (tavole non piallate) o semplicemente quello delle tavole accostate

(tavole piallate). Questi problemi possono insorgere anche quando per la realizzazione della struttura sulla superficie interna del cassero vengono utilizzate delle matrici in gomma che riproducono tessiture di altri materiali da costruzione. Le macrobolle, infine, interessano indistintamente sia gli elementi strutturali che si trovano all'interno che all'esterno. Si tratta, infatti, di difetti congeniti – indipendenti dalle condizioni climatiche o di esposizione ambientale - che sono generati da alcuni ingredienti del

calcestruzzo, dal tipo di cassero utilizzato, dal tipo di disarmante oltre che dalle procedure di posa in opera e dalla compattazione del conglomerato.

La causa responsabile della formazione delle macrobolle sulla superficie delle strutture è riconducibile alla presenza di aria nel calcestruzzo che non viene efficacemente espulsa durante la posa e la successiva vibrazione dell'impasto. L'aria, inizialmente (subito dopo il mescolamento) in forma di microbolle tende a formare delle macrobolle che vengono richiamate sulla superficie del cassero verticale ove in assenza di una efficace vibrazione, eseguita contestualmente all'avanzare del riempimento del cassero, l'aria viene schiacciata sulla parete dove, quindi, quindi si forma il difetto in forma di macrobolle.

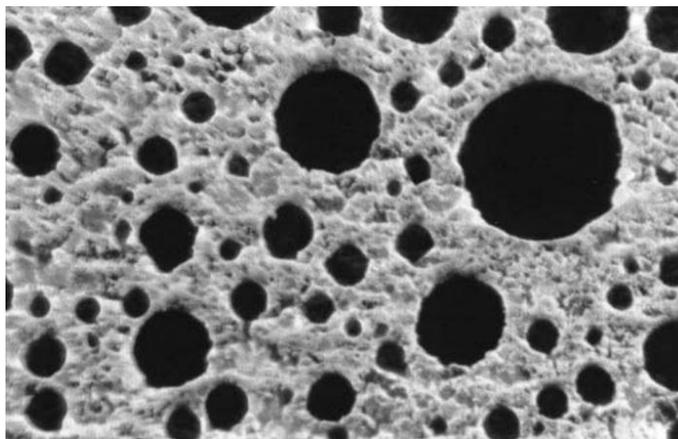


Figura 15 - Microbolle d'aria presenti nella pasta cementizia, generate dall'utilizzo di additivi aeranti

(Fonte: "Il nuovo calcestruzzo" – M. Colleparidi)

Vi sono numerosi fattori che possono favorire la comparsa di questi difetti superficiali. Il più importante è rappresentato dal tipo di cassero utilizzato per la realizzazione della struttura. La formazione di macrobolle, infatti, è favorita dall'utilizzo di casseri poco assorbenti o impermeabili quali i casseri di acciaio, di pvc rigido, di cartone con pellicola in polietilene interna, in pannelli di legno multistrato e trattati. Raramente vengono segnalati questi difetti sulle superfici di strutture realizzate con casseri costituiti da tavole di legno sia piallate che non. La formazione di queste macrobolle superficiali sembra essere anche favorita da disarmanti a base di oli minerali emulsionabili in acqua oppure da una carente vibrazione dei getti.

4.2.5 Colonizzazioni biologiche

Il ristagno delle acque piovane in zone poco soleggiate della struttura, invece, può portare alla crescita di colonizzazioni biologiche. Solitamente, si presentano in forma di muschi e licheni, o di striature di colore nero/verdastro o addirittura giallo/rosse, sulle facciate dei manufatti, ma anche sulle superfici orizzontali. I muschi che si formano (*Figura 16*), contribuiscono alla perdita di coesione tra calcestruzzo e barre d'armatura, effetto che si ha solo nel caso in cui il conglomerato sia di qualità scadente e che si aggrava in zone caratterizzate da climi particolarmente rigidi. Se invece il conglomerato è di buona qualità, queste colonizzazioni si presentano come patine sulle superfici delle strutture e principalmente il loro ruolo non interferisce con le caratteristiche prestazionali dell'opera, ma provocano solo un difetto dal punto di vista estetico.

Si può intervenire su questa tipologia di problematica ricorrendo all'idropulizia a pressione degli elementi e, successivamente, si procede con l'applicazione di prodotti idrorepellenti o acrilici, così da andare a evitare che il fenomeno si ripeta nel tempo.



Figura 16 - Colonizzazioni biologiche su elementi in calcestruzzo armato

(Fonte: Università degli studi di Bergamo, L. Coppola)

4.2.6 Efflorescenze e subflorescenze

La poca cura nella progettazione dei particolari costruttivi, volti allo smaltimento delle acque meteoriche, è una delle maggiori cause dell'accelerazione dei fenomeni di degrado delle strutture, ma provocano anche effetti secondari come la comparsa di efflorescenze sulle superfici di calcestruzzo, il dilavamento della matrice cementizia più superficiale e, infine, colonizzazioni biologiche.

Quando l'acqua piovana penetra all'interno del calcestruzzo va sciogliere l'idrossido di calcio e successivamente, quando per effetto dell'insolazione l'acqua evapora, esse trascina sulla superficie della struttura la calce idrolisi, la quale, venendo a contatto con l'anidride carbonica presente nell'aria, reagisce trasformandosi in carbonato

di calcio. Quest'ultimo favorisce la comparsa di efflorescenze biancastre di difficile eliminazione (*Figura 17*). Gli elementi strutturali maggiormente interessati a questo fenomeno sono quelli verticali, in quanto maggiormente soggetti al percolamento di acqua e colpiti direttamente dai fenomeni atmosferici. Il fenomeno risulta essere amplificato se l'edificio è sprovvisto di gronde o se sulle facciate verticali sono presenti riprese di getto, ma soprattutto se è realizzato con un calcestruzzo di qualità scadente: in questi casi le efflorescenze possono manifestarsi come una sottilissima polvere bianca, rimuovibile semplicemente con il passaggio delle dita.



Figura 17 - Grave forma di efflorescenza dovuta a calcestruzzo di cattiva qualità

(Fonte: nanocubo.it)

Questa forma di degrado è quasi esclusivamente di tipo estetico, ma può diventare, in casi del tutto eccezionali, un degrado anche in termini strutturali. Infatti, se il calcestruzzo è di scadente qualità, ovvero caratterizzato da elevata porosità, scarse prestazioni meccaniche (conseguenze di un'errata posa in opera), il fenomeno dell'efflorescenza può causare una progressiva asportazione della superficie dell'elemento, andando a esporre l'edificio ad attacchi da parte di agenti esterni, che possono provocare forme di degrado assai più gravose.

4.2.7 Dilavamento superficiale

Questo fenomeno si presenta esclusivamente in manufatti esterni, esposti quotidianamente alle intemperie; dunque, gli elementi ad essere maggiormente colpiti da questo fenomeno sono le pareti e i setti verticali degli edifici. Il dilavamento provoca la lenta asportazione della pellicola superficiale delle superfici in calcestruzzo e interessa principalmente gli elementi a sviluppo verticale. Le strutture soggette a dilavamento presentano una tessitura superficiale porosa diversamente da quella liscia tipica di una nuova struttura in calcestruzzo appena scasserata. Le zone dilavate presentano inoltre una

colorazione più scura rispetto alle zone non interessate dal problema, a causa della deposizione nelle porosità superficiali, del particolato atmosferico.

Le cause che danno luogo a dilavamento superficiale possono essere identificate nelle seguenti:

- Percolamento delle acque piovane sulla superficie dell'elemento
- Calcestruzzo di scadenti prestazioni meccaniche
- Età avanzata degli elementi in c.a.

Il dilavamento rappresenta un mero problema estetico e non è pregiudizievole per la statica o la funzionalità dell'opera

4.2.8 Deposito di particolato atmosferico

Le superfici verticali o sub-orizzontali delle strutture in calcestruzzo presentano delle striature di colore variabile dal grigio scuro al nero ad andamento prevalentemente verticale. Le striature possono interessare l'intera l'altezza dell'elemento in calcestruzzo o solo una limitata porzione a partire dalla sommità dell'elemento verticale. L'ampiezza di queste striature verticali può variare da qualche centimetro a qualche metro. In questa seconda evenienza, si rileva tuttavia una cromia non uniforme della superficie, ma strisce di colore nero o grigio scuro che si alternano a strisce grigio chiaro, ma comunque con tonalità più intense rispetto al colore della superficie del calcestruzzo non interessata dal degrado.

Il deposito di particolato atmosferico interessa le sole strutture esterne esposte all'azione dell'acqua piovana. In particolare, sono esposte a questo tipo di degrado le strutture verticali, i setti e le pareti in calcestruzzo, gli elementi di facciata (parti aggettanti quali frontalini di balconi), parapetti, muretti di recinzione, corpi scala esterni, ecc.

Il deposito di particolato atmosferico è direttamente riconducibile ad un costante percolamento di acqua piovana sulla superficie degli elementi in calcestruzzo. Pertanto, la causa principale di questa tipologia di degrado è direttamente ascrivibile ad un difetto nella raccolta e nello smaltimento delle acque o a errori legati a scelte progettuali. Il degrado interessa prevalentemente le superfici verticali di elementi in calcestruzzo privi, ad esempio, di cornicioni, di scossaline, di opportuni gocciolatoi. Il deposito di particolato atmosferico è, inoltre, favorito da calcestruzzi particolarmente scadenti con una elevata porosità superficiale per la facilità con cui il particolato può essere depositato all'interno dei pori della matrice cementizia.

Il deposito di particolato atmosferico rappresenta un problema puramente di carattere estetico per l'inevitabile deturpamento della originale cromia del conglomerato

cementizio. Sebbene l'azione persistente dell'acqua piovana possa determinare anche la solubilizzazione della calce, tale effetto deve ritenersi trascurabile e ingegneristicamente poco significativo.



Figura 18 - Deposizione di particolato atmosferico su elementi in calcestruzzo armato

(Fonte: Collegio dei Geometri di Agrigento)

È da segnalare tuttavia, come la persistenza di acqua sulla superficie delle strutture in calcestruzzo possa comunque dar luogo a degradi più importanti delle strutture quali la formazione di colonie di origine biologica, la corrosione delle barre di armatura promossa dalla CO₂ atmosferica e la conseguente espulsione del calcestruzzo del copriferro.

4.2.9 Distacchi di intonaci e rivestimenti e pellicole pittoriche

In edifici di vecchia data, come in quelli più moderni, molto spesso si trova l'intonaco a fare da copertura alla struttura in calcestruzzo ed è uno tra i componenti costitutivi di un fabbricato ad essere maggiormente soggetto a degrado materico.

Dal punto di vista tecnico l'intonaco è formato da una miscela opportunamente dosata di leganti, aggregati e acqua, così da ottenere un prodotto lavorabile e di facile utilizzo.

L'intonaco svolge svariate funzioni, oltre a quella estetica cui è solitamente associato; infatti, va a regolarizzare eventuali disuniformità di spessore delle facciate, ma funge anche da protezione alle strutture cui è applicato, in quanto protegge da intemperie, sbalzi climatici e umidità.

Generalmente l'intonaco è composto da tre strati:

- Strato d'aderenza, con lo scopo di garantire l'adesione alla parete strutturale in calcestruzzo armato;
- Strato di fondo, il quale funge da scheletro alla miscela e conseguentemente permette di andare a regolarizzare le superfici delle facciate;

- Strato di finitura, grazie al quale l'intonaco fornisce il suo valore estetico.
- Il degrado dell'intonaco è un fenomeno molto diffuso (*Figura 19*), che solitamente avviene per distacco dello strato di aderenza dalla facciata in calcestruzzo e principalmente è scaturito da quattro possibili cause:
- Presenza di fessure nell'elemento strutturale sul quale è applicato, dovute ad assestamenti naturali o a umidità derivante da pioggia e inadeguata protezione;
- Erronea o scadente posa della finitura esterna;
- Degrado dovuto alla presenza di umidità nelle pareti, infiltrazioni d'acqua e muffe sui muri;
- Arrivo allo stato limite ultimo dell'elemento di alleggerimento, ovvero sfondellamento delle pignatte, se il degrado dell'intonaco proviene dal soffitto.

Sulle pareti esterne, dove gli intonaci solitamente hanno una vita media che varia dai 20 ai 30 anni, il degrado è solitamente dovuto a infiltrazioni d'acqua e sbalzi climatici, i quali causano in primo luogo un rigonfiamento, che va a sfociare, in un secondo momento, in un vero e proprio distacco della superficie intonacata, che va a estendersi in maniera molto rapida. Negli ambienti interni, invece, si riscontra una vita media decisamente più longeva, escludendo casi eccezionali di umidità, i quali sfociano in fenomeni di degrado simili a quelli sopra descritti.



Figura 19- Distacco dell'intonaco da un pilastro in calcestruzzo armato

(Fonte: Lavoriincasa.it)

Bensì possono manifestarsi anche fenomeni di distacco dei rivestimenti di facciata, che possono essere realizzati in svariati materiali, quali pietra, ceramica e quant'altro. Solitamente, in questo caso particolare, il distacco avviene precisamente tra i due elementi, ovvero tra il getto in calcestruzzo e il rivestimento presente.

Il fenomeno in questo caso si manifesta con la formazione di fessure, ma se gli elementi che vanno a rivestire le superfici di calcestruzzo sono estremamente flessibili, questi possono subire un distacco omogeneo, soprattutto se il rivestimento è in materiale plastico.

Questa forma di degrado può risultare estremamente pericolosa dal punto di vista dell'incolumità dei passanti, per via del distacco degli elementi del rivestimento, che possono precipitare durante il transito di essi.

4.2.10 Vespai e nidi di ghiaia

I vespai e i nidi di ghiaia rappresentano dei difetti di facile identificazione negli elementi strutturali in quanto le zone interessate si presentano carenti di pasta di cemento e con un eccesso di aggregati grossi che, non essendo inglobati da un sufficiente volume di matrice cementizia, manifestano una porosità macroscopica con vuoti di dimensioni centimetriche.

Sebbene i vespai e i nidi di ghiaia possano interessare qualsiasi elemento strutturale in calcestruzzo armato essi si presentano in misura maggiore e più ricorrente nelle strutture verticali quali pilastri, setti, pareti di taglio, muri di sostegno, ecc. Questi difetti sono presenti in misura maggiore nelle strutture verticali in quanto la loro formazione è favorita da una maggiore altezza di caduta del calcestruzzo durante la posa in opera. Tuttavia, i vespai possono riscontrarsi anche in elementi orizzontali come solette e travi allorquando si commettono evidenti errori di posa di calcestruzzi che per carenze composizionali (eccesso di acqua e ridotto tenore di materiale fine) sono segregabili. Particolarmente esposti al rischio di segregazione, infine, sono i pali di fondazione realizzati gettando il calcestruzzo dal piano di campagna a causa delle rilevanti altezze di caduta del conglomerato variabili da 15 a 30 m. Un particolare tipo di segregazione è quello che si verifica allorquando l'esecuzione della struttura avviene per applicazione del calcestruzzo a spruzzo contro una cassetta. A questo tipo di realizzazione si ricorre quando, per la complessa geometria dell'elemento da realizzare risulta economicamente non conveniente effettuare un getto di calcestruzzo fluido entro cassero. La segregazione in queste situazioni viene promossa dal fatto che durante il getto, il calcestruzzo è impossibilitato a raggiungere tutti i punti della sezione per effetto del cono d'ombra generato dalla presenza dei ferri di armatura proprio dietro alle stesse barre.

La formazione dei vespai e dei nidi di ghiaia è determinata da errori di posa in opera del conglomerato cementizio. Durante la posa, infatti, se il calcestruzzo raggiunge il fondo del cassero con altezze di caduta maggiori di 2 metri, per effetto della diversa

dimensione dei materiali che lo compongono (gli aggregati grossi hanno granuli di dimensioni maggiori rispetto alla sabbia, che a sua volta possiede dimensioni maggiori rispetto al filler e al cemento utilizzato) oltre che per la differente massa volumica, gli elementi di maggiori dimensioni (gli inerti grossi) arrivano sul fondo con una maggiore velocità rispetto alle particelle di dimensioni minori come l'acqua, il cemento ed il filler che, per contro, si accumulano sulla superficie.



Figura 20 -Segregazione dei componenti sul fondo del getto

(Fonte: Università degli studi di Bergamo, L. Coppola)

La segregazione del calcestruzzo e l'accumulo di aggregati grossi sul fondo del cassero di un elemento verticale aumentano con l'altezza di caduta del calcestruzzo. Inoltre, questi difetti sono maggiormente presenti nelle strutture verticali con sezioni minime laddove lo spazio tra i ferri non consente di introdurre il tubo getto. La formazione di nidi di ghiaia e vespai è altresì favorita dall'erronea aggiunta all'impasto cementizio direttamente in betoniera che concorre alla segregazione delle componenti.

4.2.11 Riprese di getto

Le riprese di getto si presentano con una linea irregolare ad andamento prevalentemente orizzontale (o sub-orizzontali) che demarcano superfici di calcestruzzo di differenti tonalità cromatiche. Generalmente, queste linee irregolari non rappresentano una vera e propria discontinuità dell'elemento in calcestruzzo. La ripresa di getto, tuttavia, può presentarsi anche in forma di una vera e propria soluzione di continuità di ampiezza variabile fino a qualche decimo di millimetro. Nei casi più gravi la ripresa di

getto può essere accompagnato da segregazione del conglomerato con formazione di vespai e nidi di ghiaia privi di pasta di cemento. Quando la ripresa di getto interessa non lo stesso elemento strutturale, ma due strutture distinte (per esempio fondazione-

muro, soletta aggettante parapetto, ecc.) la stessa è anche caratterizzata dal fatto che la superficie dei due elementi in calcestruzzo si trova su due piani distinti.



Figura 21 – Elemento caratterizzato dalla ripresa di getto

(Fonte: Università degli studi di Bergamo, L.Coppola)

Sono prevalentemente le strutture verticali ad essere interessate dalle riprese di getto sebbene non siano immuni dal problema anche quelle orizzontali. Per queste ultime le problematiche insorgono soltanto nelle pavimentazioni di grande estensione superficiale allorquando non è possibile realizzare il getto in una sola giornata lavorativa. In questo caso la ripresa di getto si presenta in forma di fessurazione vera e propria e può essere accompagnata da un disallineamento sulla verticale delle due porzioni di pavimentazione gettate in giorni distinti. Nei casi più gravi la ripresa di getto è accompagnata dallo sbriciamento del calcestruzzo a ridosso della ripresa di getto. Negli elementi verticali il problema si presenta quando il setto è di notevole altezza ed estensione da non poter essere completato con un getto in continuo. Inoltre, le riprese di getto interessano elementi distinti quali: fondazione-muro, parapetto-soletta rampante, parapetto-balcone, ecc.

Le riprese di getto sono da attribuire esclusivamente a errori di esecuzione delle strutture e/o a carenze di progettazione per quanto attiene ai particolari costruttivi. Gli errori di esecuzione/progettazione tipici sono quelli che non prevedono le tempistiche di realizzazione del getto e pertanto omettono di ricorrere all'utilizzo di profili che "marchino" la stessa ripresa.

Nei casi meno gravi la ripresa di getto costituisce una mera difettosità di carattere estetico: è il caso delle riprese che non evidenziano soluzioni di continuità. Se la ripresa è accompagnata dalla comparsa di fessure il danno è di maggiore entità in quanto all'effetto estetico si somma una vulnerabilità della Struttura per quanto concerne

l'aggressione ambientale oltre, ovviamente alla mancanza di tenuta idraulica dell'elemento strutturale. Nel caso delle strutture orizzontali ove per effetto della ripresa di getto mal eseguita le superfici del pavimento presentano un disallineamento il passaggio di carichi mobili può determinare lo sbrecciamento del calcestruzzo.

4.2.12 Pop-out

Le alterazioni in forma di pop-out sono tipiche dell'estradosso di pavimentazioni in calcestruzzo rifinite in superficie con uno strato di usura realizzato con la tecnica dello spolvero. Questa consiste nel seminare, dopo aver gettato il calcestruzzo, e prima che termini la presa, sulla superficie estradosale una miscela anidra costituita da quarzo e cemento che viene incorporata nel conglomerato cementizio

mediante fratazzatura realizzata con un utensile provvisto di pale rotanti e che: per questo, in gergo viene definito elicottero. Il pop-out si presenta in forma di espulsione di coni di qualche centimetro di diametro costituiti in parte dallo strato di usura superficiale e in parte dal calcestruzzo della piastra. Generalmente, sul retro questi coni riportano anche un frammento dell'aggregato che ha innescato la reazione espansiva responsabile della formazione del pop-out. I pop-out si manifestano molto rapidamente, generalmente nei primi mesi di vita dell'opera. Nelle strutture esterne a contatto con le acque piovane, ma anche in quelle interne che vengono sottoposte a continui lavaggi con acqua, la manifestazione del danno è più celere. Un'accelerazione ulteriore del fenomeno può essere prodotta dalla mancanza di barriera vapore (il foglio di politene che viene steso sulla massicciata prima di gettare il calcestruzzo). In questa evenienza, infatti, l'acqua che risale dal sottofondo accelera il processo di degrado. Per questo motivo il danno è particolarmente rilevante anche in quelle pavimentazioni che non posseggono barriera vapore, ma superficialmente sono rifinite con un rivestimento in resina (epossidica o poliuretana) impermeabile. La presenza di questo rivestimento, infatti, determina un incremento del grado di saturazione del calcestruzzo che accelera la formazione dei pop-out.

La formazione dei pop-out è imputabile alla reazione tra alcune forme di silice non stabili agli alcali che possono essere presenti negli aggregati lapidei utilizzati per il confezionamento del calcestruzzo e il sodio e potassio presenti nella fase acquosa dei pori capillari della matrice cementizia apportati dal cemento utilizzato per la produzione del conglomerato.



Figura 22 – Fenomeno di pop-out

(Fonte: Università degli studi di Bergamo, L. Coppola)

I danni connessi con la formazione dei pop-out rappresentano un problema non solo dal punto di vista estetico, ma anche da quello legato alla funzionalità della pavimentazione. In corrispondenza dei crateri, infatti, per il continuo passaggio dei mezzi su

ruote il calcestruzzo tende con facilità a sbracciarsi.

Questa alterazione può rappresentare un danno molto grave se i pavimenti riguardano luoghi abitati o opifici dove si effettuano lavorazioni di alimenti.

4.2.13 Distacco dello strato corticale o di usura delle pavimentazioni

Il degrado coinvolge gli strati superficiali di pavimentazioni in calcestruzzo e si presenta in forma di scaglie che possono coinvolgere aree molto estese. Le scagliature possono inoltre, ulteriormente ridursi come dimensione per effetto dell'azione dei cicli di gelo-disgelo o per il passaggio di mezzi su ruote. Nelle forme più pronunciate di degrado lo strato corticale può presentarsi anche completamente

sbracciato. In tutte le situazioni sopramenzionate il danneggiamento coinvolge sia lo strato di usura che la sottostante piastra in calcestruzzo. In assenza di strato di usura il danneggiamento si rivela in forma di asportazione della pasta superficiale senza presentare scagliature e, in presenza di cicli di gelo-disgelo connessi con l'utilizzo di sali disgelanti, il degrado tende a formare grosse buche nella pavimentazione (pot-holes). Questi fenomeni di degrado possono manifestarsi immediatamente se sono stati commessi errori nell'incorporo dello strato di usura nella sottostante pavimentazione. Per esempio, se l'applicazione dello spolvero è avvenuta troppo in anticipo o troppo in ritardo rispetto alla presa del materiale. In queste situazioni, il danneggiamento è evidente sin dai primi passaggi dei mezzi sul pavimento. Nel caso di pavimenti con strato di usura ben incorporato alla pavimentazione il danno è funzione delle condizioni climatiche e se il ricorso all'utilizzo di sali disgelanti è massiccio o meno.

In queste situazioni il danneggiamento per manifestarsi ha bisogno di qualche anno di esercizio. Il distacco può manifestarsi per errori nell'esecuzione dello strato di usura

ma anche un'applicazione precoce dello spolvero determina lo scartellamento superficiale.



Figura 23 – Pavimentazione in cls usurata

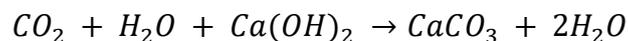
(Fonte: Università degli studi di Bergamo, L. Coppola)

Infatti, se il calcestruzzo è ancora fresco l'acqua che risale verso l'estradosso per effetto del bleeding, non potendo pervenire sulla superficie del pavimento per la presenza dello strato di usura che si presenta denso e compatto, favorisce l'accumulo di lenti di acqua al di sotto degli strati più corticali del calcestruzzo.

4.2.14 Corrosione delle armature metalliche ed espulsione del copriferro

4.2.14.1 Corrosione di calcestruzzo e ferri d'armatura dovuta all'anidride carbonica

L'anidride carbonica è sempre presente nell'atmosfera, in una concentrazione che va dai 350 ai 380 ppm. Questo ossido acido va a interagire con i costituenti della pasta cementizia, principalmente con l'idrossido di calcio, ottenuto dal processo di idratazione del cemento, dando inizio al processo chimico, conosciuto come carbonatazione:



La reazione di carbonatazione può dare effetti positivi, ma anche negativi, relativamente all'ambito in cui si sviluppa. Uno degli aspetti positivi è dato dal fatto che questa reazione genera un aumento delle prestazioni meccaniche e dona impermeabilità al calcestruzzo, mentre, come effetto negativo, va a generare un aumento del ritiro del calcestruzzo.

L'effetto, però, cui bisogna dedicare maggiore attenzione è legato al calo del pH delle soluzioni acquose interne ai pori capillari del conglomerato cementizio (Figura 24). Un calcestruzzo in condizioni ottimali (quindi in assenza di CO₂) ha un pH che varia da 12.7 a 13.5, il quale crea un film di ossido ferrico passivo, di spessore nanometrico (>2nm), sulle barre d'armatura, che va a renderle impermeabili all'azione di umidità e

ossigeno. Il problema si evidenzia quando invece l'anidride carbonica si diffonde nella matrice cementizia, andando inizialmente ad abbassare il pH al di sotto di 11, valore oltre il quale il film protettore delle barre d'armatura viene neutralizzato ed esse si trovano esposte a una possibile aggressione. Il fenomeno si aggrava ulteriormente quando il pH arriva a valori di circa 8.3, creando definitivamente un ambiente scarsamente alcalino per le armature e determinando le premesse per la loro corrosione.

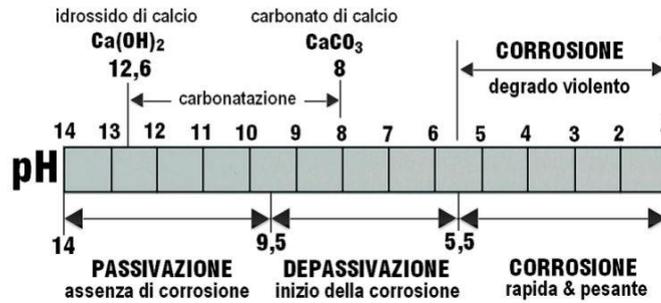


Figura 24 - Andamento della concentrazione idrogenionica (pH)

Il progredire della carbonatazione, all'interno di una struttura in calcestruzzo armato, diminuisce all'aumentare della resistenza a compressione del conglomerato, ottenuto grazie al calo del volume e dei pori capillari interni, dovuto all'abbassamento del rapporto acqua/cemento. A pari caratteristiche qualitative del conglomerato cementizio, la reazione di carbonatazione avanza con più velocità nelle opere situate in zone caratterizzate da una bassa percentuale di umidità relativa, come avviene negli ambienti indoor, mentre procede con velocità minore nelle strutture esterne, poiché, grazie all'acqua piovana, si ha un blocco provvisorio dell'espansione dell'anidride carbonica, in quanto essa va a saturare i pori capillari del conglomerato.

La velocità di progressione della reazione di carbonatazione dipende anche dal processo di maturazione che ha subito il calcestruzzo, subito dopo il getto in opera; infatti, la stagionatura del conglomerato garantisce una migliore idratazione delle zone direttamente interessate alla carbonatazione, di conseguenza si ha una riduzione dei pori, che consente di rallentare l'insinuarsi dell'anidride carbonica.

Bensì, quando la carbonatazione raggiunge le barre d'armatura, si innesca il processo di corrosione, generando un'espansione che provoca un distacco del copriferro da queste ultime, arrivando a una completa espulsione (Figura 25).



Figura 25 - Carbonatazione del calcestruzzo: espulsione del copriferro

(Fonte: ingenio-web.it)

Più precisamente, la corrosione dei ferri d'armatura, è una reazione elettrochimica che si manifesta con determinati processi (Figura 26):

- *Processo anodico*: si verifica l'ossidazione del metallo, cui segue un rilascio di elettroni e acidità;
- *Processo catodico*: in presenza di acqua avviene una riduzione d'ossigeno, che consuma gli elettroni messi a disposizione dal processo precedente.

Perché questi due processi funzionino correttamente è necessario che tra loro ci sia corrente, la quale si genera attraverso le barre d'armatura, tramite la zona anodica dove vengono rilasciati gli elettroni e attraverso il calcestruzzo, dove la circolazione della corrente si interrompe grazie all'effetto degli ioni disciolti nell'acqua contenuta nei micropori del conglomerato.

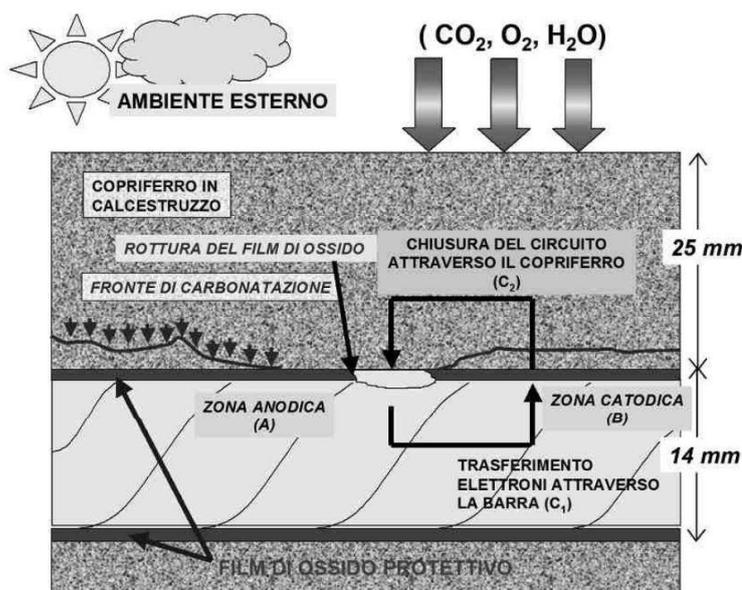


Figura 26 - Corrosione delle strutture in calcestruzzo armato: un processo elettrochimico

Per evitare il degrado, dovuto all'aggressione da parte di anidride carbonica è necessario ridurre la porosità del conglomerato cementizio, così da ridurre l'espansione della CO₂, andando a creare un calcestruzzo caratterizzato da un rapporto acqua/cemento

basso, tanto più è elevato il rischio di corrosione ma soprattutto è necessario aumentare dello spessore del copriferro, così che il processo di corrosione si presenti solo verso il termine della vita utile dell'opera.

4.2.14.2 Corrosione delle armature dovuta all'attacco dei cloruri

La corrosione dovuta alla penetrazione di cloruri è uno dei fenomeni più gravosi e diffusi per le strutture in cemento armato, specialmente se queste sono collocate in un ambiente marino o se sottoposte all'azione di sali disgelanti.

Gli ioni cloruro possono essere già presenti all'interno della miscela di calcestruzzo, se aggiunti erroneamente attraverso i vari ingredienti (acqua, aggregati, cemento, additivi) oppure possono provenire dall'ambiente esterno: la CO₂ in atmosfera varia dallo 0,04% allo 0,2%, valori dipendenti dalla percentuale di inquinamento che si presenta.

Il calcestruzzo, a contatto con questi ioni, tende ad arricchirsi con il tempo e la penetrazione dei cloruri al suo interno si può rappresentare come un profilo di concentrazione decrescente, dalla superficie a diretto contatto con l'ambiente esterno, verso l'interno della struttura. Dunque il calcestruzzo neutralizza gli ioni tramite gli alcalini solubili presenti all'interno dei pori e tramite il calcio presente nella matrice cementizia; questo processo può essere sintetizzato mediante la seguente reazione:



Il pH della soluzione acquosa si riduce fino a essere pari circa a 7 (partendo da un valore pH = 13), ovvero arrivando quasi alla neutralità.

Dopo un determinato tempo cui la struttura si trova sottoposta all'azione dei cloruri, la loro concentrazione sarà tanto più elevata, quanto più è elevata la concentrazione di cloruri nella soluzione a contatto con la superficie di calcestruzzo e maggiore è il coefficiente di diffusione della pasta cementizia, che segue la legge:

$$s = K \cdot t^{1/n}$$

Dove: s = spessore dello strato carbonatato; t = tempo; n = valore dipendente dalla compattezza della matrice cementizia (in calcestruzzi porosi si può assumere pari a 2, mentre in quelli compatti i valori sono crescenti fino a velocità del processo nulla); K = valore dipendente dalle condizioni di umidità.

Da questa relazione si evince come la carbonatazione diminuisca col passare del tempo al variare dei valori di K e n . La velocità di penetrazione della CO₂ all'interno dei pori pieni d'aria avviene facilmente, a differenza di pori riempiti invece di acqua, dove la penetrazione avviene con una velocità nettamente inferiore.

Gli ioni cloruro hanno la capacità di abbattere il film passivante che protegge le armature dagli agenti aggressivi, in quanto la stabilità del film viene compromessa nel

momento in cui, in prossimità delle barre d'acciaio, si concentrano quantità critiche di cloruri, capaci di innescare il processo di corrosione.

La corrosione dell'acciaio dovuta ai cloruri si manifesta tramite vaiolatura o pitting (*Figura 27*), ovvero crateri compresi tra 0.1 e 2 mm, formati attraverso una microcella di corrosione, in cui le zone dove l'ossido è stato rimosso fungono da anodo e quelle circostanti, ancora passive, fungono da catodo, processo grazie al quale avviene la riduzione dell'ossigeno.



Figura 27 - Corrosione per pitting

(Fonte: Politecnico di Torino)

Per evitare un degrado precoce delle strutture risulta importante l'adozione di strategie preventive, tra cui l'impiego di inibitori di corrosione, la protezione della superficie degli elementi in calcestruzzo, tramite rivestimenti a base di malte polimerocemento o con rivestimenti poliuretanicici e infine si può pensare alla protezione catodica; quest'ultima risulta essere estremamente efficace, ma allo stesso tempo è complessa la modalità d'intervento su opere esistenti, per cui è principalmente viene utilizzata per opere di nuova realizzazione.

4.2.14.3 Degrado di calcestruzzo e ferri d'armatura dovuto ai solfati

L'attacco solfatico costituisce una delle cause più aggressive di deterioramento di un'opera in calcestruzzo armato. Con la terminologia "attacco solfatico" si indica il degrado proveniente dall'interazione della matrice cementizia con gli ioni solfati: gli ioni SO_4 possono essere presenti in terreni o acque che si trovano a diretto contatto con le strutture.

I solfati possono essere di origine biologica, dovuti alla decomposizione di sostanze organiche contenenti solfuro di ferro (pirite), oppure possono essere una derivazione dell'inquinamento prodotto da attività domestiche e industriali. È bene citare anche la presenza di idrogeno solforato in impianti fognari, vasche di depurazione e in vasche di raccolta di liquami, il quale può essere trasformato in acido solforico e attaccare severamente il calcestruzzo. Infine, i solfati possono trovarsi anche in acqua di mare, in laghi superficiali o nelle paludi, solitamente in forma di solfato di magnesio.

L'attacco solfatico agisce formando dei composti che risultano essere estremamente pericolosi per la durabilità del calcestruzzo: l'idrossido di calcio si lega al solfato,

andando a formare gesso biidrato, che porta a un aumento di volume, di conseguenza gli alluminati contenuti nel cemento reagiscono con i solfati e danno forma all'ettringite, generando un ulteriore aumento di volume; infine, si assiste alla formazione di thaumasite, che porta la matrice cementizia all'incoerenza.

L'esperienza accumulata nell'ultimo secolo evidenzia come l'attacco solfatico si manifesti maggiormente in opere in cemento armato quali canali d'irrigazione, collettori fognari, gallerie e, solitamente, quest'attacco è accompagnato da altri fenomeni come: gelo-disgelo, reazione alcali-aggregati, cristallizzazione di sali e variazioni termometriche, che portano il calcestruzzo a fessurazione.

Gli effetti del degrado causati dall'attacco solfatico si manifestano, quindi, in forma di espansioni e disallineamenti delle strutture, cui segue l'origine di quadri fessurativi e di espulsioni di parti del manufatto (*Figura 28*). In condizioni eccezionali, l'attacco solfatico assume le caratteristiche di un'aggressione acida, generando l'abbattimento della matrice del legante cementizio, ricordando il comportamento di una terra incoerente.

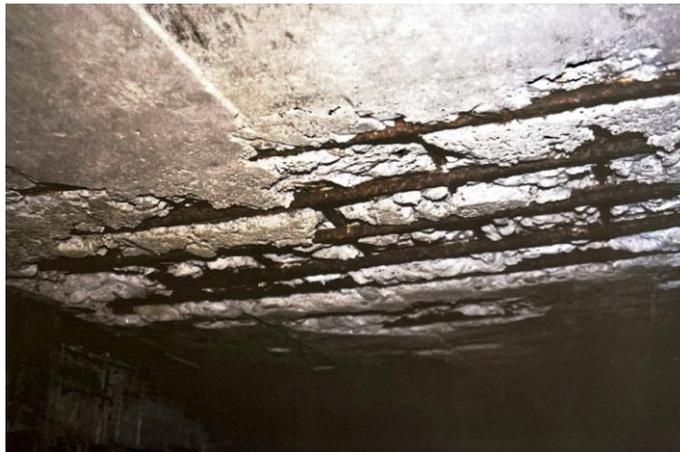


Figura 28 - Degrado di calcestruzzo e armature dovuto all'attacco solfatico

(Fonte: S. Antonietti – IMC- SUPSI)

Per valutare la severità dell'attacco solfatico si deve misurare la concentrazione di solfato nell'ambiente (ovviamente maggiore sarà la percentuale solfatica, maggiore sarà l'entità del degrado). Seguentemente si può procedere con l'adozione di un cemento chimicamente in grado di resistere ai solfati, mantenendo un rapporto acqua/cemento tanto più basso, quanto più severo è l'attacco.

Capitolo 5

IL PROCESSO DIAGNOSTICO

Prima di procedere alla definizione di un intervento di ripristino o consolidamento è indispensabile definire le cause che hanno innescato gli effetti dell'alterazione, del degrado e/o del dissesto dei singoli elementi in c.a.

La ricerca delle cause, la diagnosi appunto, è indispensabile nelle strutture esistenti poiché l'obiettivo principale della messa in pristino è rappresentato dall'eliminazione delle cause responsabili delle patologie e/o carenze di cui la struttura è affetta.

Questa constatazione non era così evidente nel passato, dove era diffuso il convincimento che i materiali, come per esempio il calcestruzzo, fossero "eterni".

Il tema della diagnostica strutturale è da tempo un argomento particolarmente attuale in quanto l'imperativo categorico della medicina "prevenire è più vantaggioso che curare" è ora direttamente mutuato anche per le costruzioni esistenti. Prima di affrontare il tema del "recupero" infatti, è necessario disporre, oltre che della conoscenza visiva del manufatto, anche di adeguati metodi di indagine strumentale e delle tecniche di controllo strutturale che permettono al progettista di acquisire la base di dati indispensabile per potere formulare un'ipotesi di intervento.

L'intervento di recupero di un edificio, a prescindere dal suo valore architettonico e/o artistico, sarà tanto più mirato quanto più profonda sia la conoscenza della fabbrica dall'originale allo stato attuale.

In questo contesto, si inserisce l'attività della diagnostica che viene utilizzata per investigare le modalità costruttive dei dettagli ma anche per rilevare le caratteristiche meccaniche dei materiali utilizzati.

Lo studio delle indagini non distruttive ha avuto un forte sviluppo intorno agli anni '70 ed '80: proprio in tale periodo infatti è stata messa a punto la maggior parte delle tecniche non distruttive ancora oggi in largo utilizzo nel campo delle costruzioni civili. Numerosi sono stati i lavori finalizzati alla corretta interpretazione dei risultati delle prove non distruttive condotte in situ, anche sulla spinta delle ditte produttrici di strumenti di

prova, interessate a migliorare le apparecchiature da loro prodotte ed a renderne più semplice l'utilizzo (anche mediante la redazione di tabelle e curve di correlazione standard che fossero sufficientemente affidabili).

Seppure i principi di base siano gli stessi per qualsiasi tipologia di struttura, le indagini conoscitive da condurre variano a seconda che l'edificio abbia una struttura in cemento armato, in acciaio o in muratura.

Le attività di indagini in situ ed in laboratorio dipendono da alcuni fattori legati soprattutto al problema delle risorse disponibili, in termini di tempo e di budget, diversificati a seconda del valore artistico del monumento, dell'entità dei danni e dal tipo di intervento. Per queste ragioni la fase diagnostica può essere pianificata a diversi livelli di approfondimento, in base al tipo di edificio e alle finalità delle indagini.

La diagnosi dello stato di alterazione, degrado e/o dissesto di una costruzione esistente deve avvenire attraverso un percorso metodologico i cui punti salienti possono essere riassunti nei seguenti:

- 1) Esame visivo
- 2) Reperimento della documentazione tecnica esistente
- 3) Ricerca delle cause perturbatrici
- 4) Indagini in situ ed esami di laboratorio su campioni estratti

A questi seguiranno:

- 5) Valutazioni delle condizioni di sicurezza
- 6) Progetto degli interventi di rinforzo
- 7) Il processo che porta all'interpretazione della condizione attuale dell'edificio è interattivo in quanto le ipotesi di lavoro sulle quali viene basata la campagna sperimentale possono e, anzi, devono essere revisionate ed aggiornate man mano che si acquisiscono nuove informazioni durante l'iter.

5.1 PRIMA FASE: PRE-DIAGNOSI

In base a quanto sopra riportato appare del tutto evidente che l'osservazione sperimentale assume un ruolo centrale nel processo diagnostico costituendo la base informativa indispensabile per l'individuazione delle cause di patologie e per la stima delle risorse statiche attualmente disponibili.

Il processo diagnostico è costituito da una fase preliminare che ha lo scopo di verificare l'esistenza di una situazione patologica, di descriverne la natura e dare una prima valutazione sommaria per quanto riguarda i possibili effetti sulle prestazioni, la vita

residua e la sicurezza della struttura. Molto importante, in questa fase, è la capacità di riconoscere eventuali danni e deficienze statiche che possono prefigurare situazioni di crisi imminente e quindi di predisporre tempestivamente gli opportuni interventi di rinforzo.

5.1.1.1 *Esame visivo: il sopralluogo*

Al fine di formulare una corretta diagnosi è indispensabile per il tecnico recarsi presso la struttura per effettuare un'accurata analisi visiva degli elementi strutturali e non strutturali di cui si compone.

L'esame visivo consiste nell'identificazione di tutte le patologie, alterazioni e/o degrado dei materiali sia dei singoli elementi che dell'opera nel suo complesso oltre alla rilevazione dei quadri fessurativi.

Relativamente alla rilevazione dei quadri fessurativi sarà necessario stabilire la cronologia di manifestazione della soluzione di continuità.

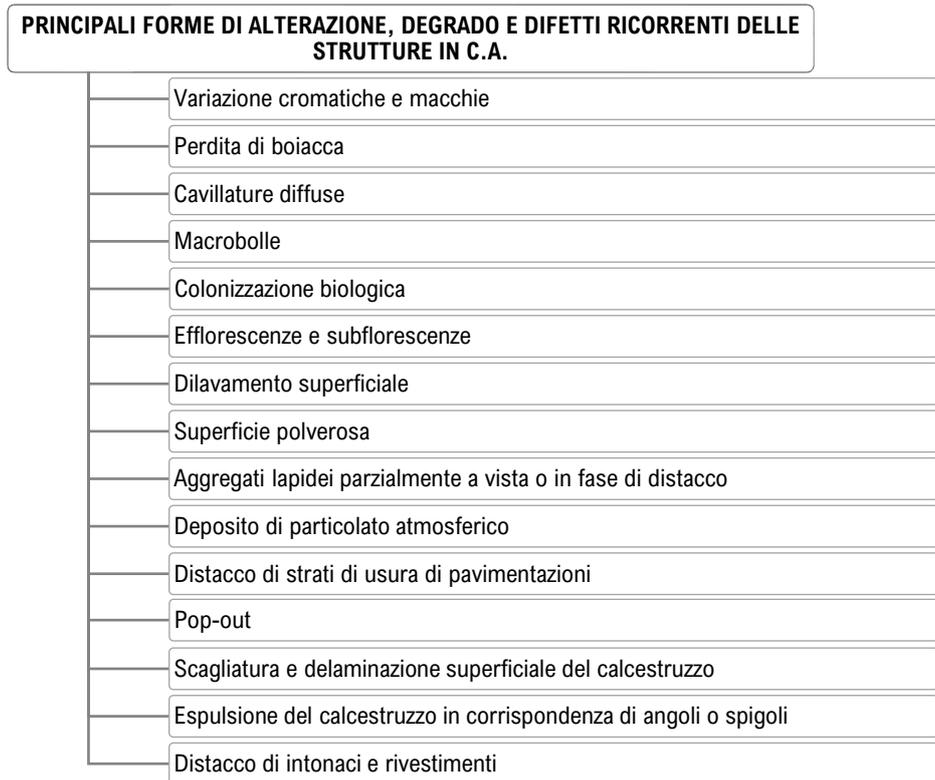
Vale la pena ricordare a tal proposito come la *comparsa di lesioni durante la fase realizzativa dell'opera* è generalmente connessa con errori legati, ad esempio, alla mancata maturazione umida, a fenomeni di ritiro autogeno nei calcestruzzi ad alta resistenza oppure al ritiro igrometrico non opportunamente fronteggiato sia in fase progettuale che esecutiva.

La situazione si presenta ben diversa quando le fessurazioni si manifestano in concomitanza di eventi che interessano le aree circostanti la struttura oggetto di indagine come, ad esempio, la realizzazione di nuovi edifici o scavi. In questo caso le fessurazioni potrebbero essere ascritte a cedimenti fondazionali legati alla variazione delle condizioni di pressione sul terreno determinate dal mutamento delle condizioni al contorno.

In sostanza, indipendentemente dalla natura del dissesto/degrado in fase di sopralluogo per l'esame visivo è fondamentale ricercare il nesso causa-effetto.

In relazione alle fessure sarà necessario valutare la localizzazione e l'andamento in funzione dello schema statico dell'elemento fessurato oltre ad eventuali cinematismi in atto al fine di stabilirne la pericolosità dal punto di vista strutturale.

Per quanto riguarda il rilievo delle forme di alterazione delle superfici e degrado dei materiali che costituiscono gli elementi in c.a. si rimanda ai Capitoli 4 e 5 in cui sono stati analizzati i caratteri macroscopici tipici di queste forme di danneggiamento.



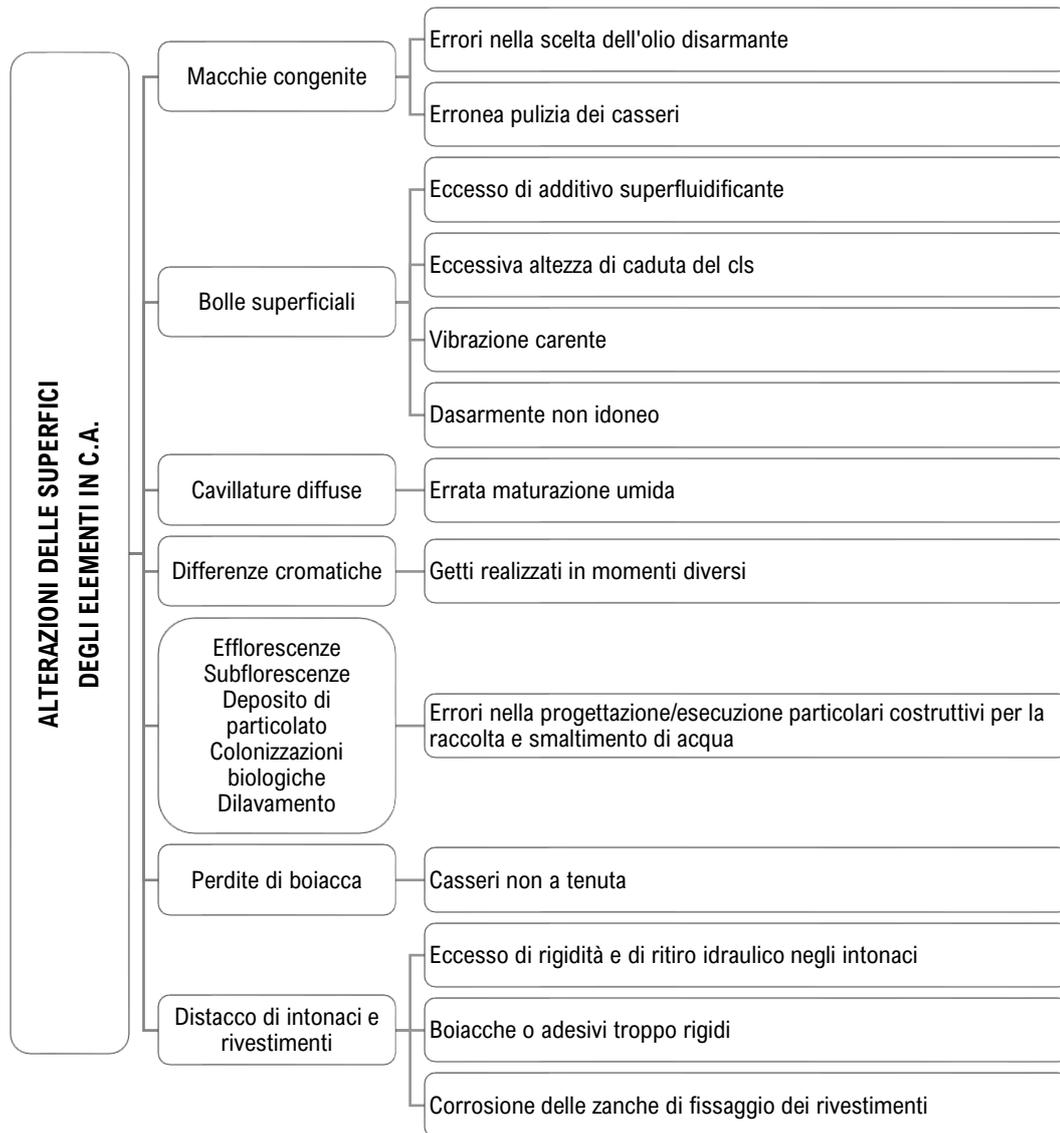
Queste forme di alterazione sono collegate a difetti di costruzione o a fenomeni di tipo fisico o chimico tra i materiali utilizzati e l'ambiente in cui è situata la costruzione.

Sebbene le casistiche dei fenomeni di degrado siano innumerevoli è possibile raggrupparle in tre grandi categorie:

- Alterazione delle superfici dei materiali da costruzione
- Alterazione delle sezioni degli elementi costruttivi
- Fessurazioni, perdita, distacco ed espulsione di materiale dalla sezione in c.a.

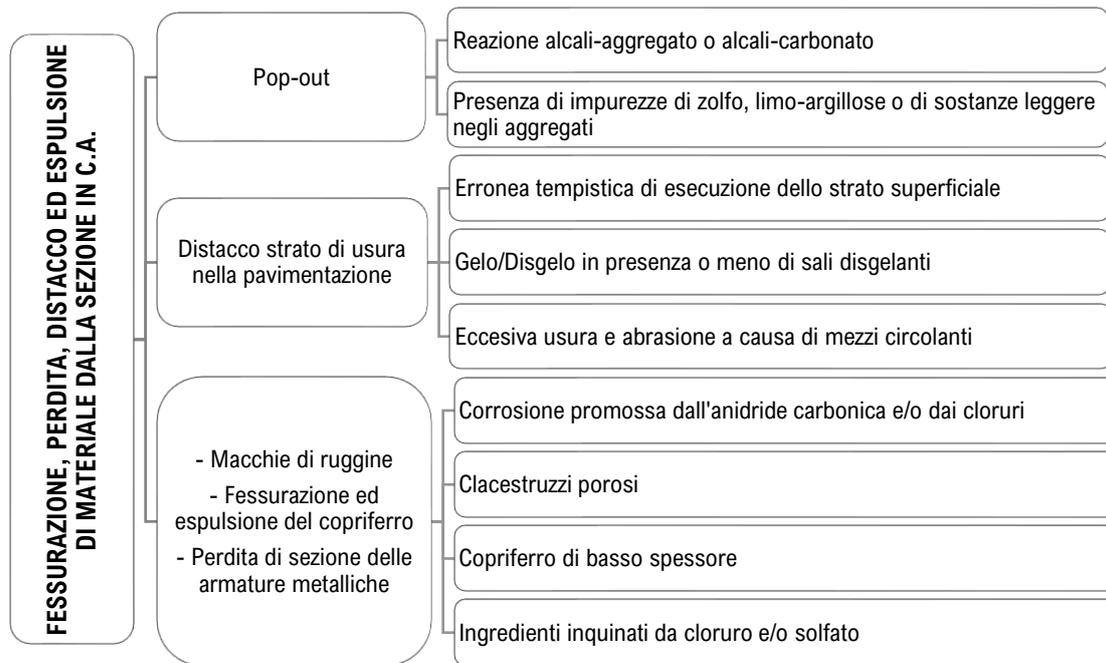
In linea di massima le alterazioni delle superfici e delle sezioni sono di facile diagnosi in quanto sono legate ad errori esecutivi durante la realizzazione dell'opera e/o a difetti della realizzazione di particolari costruttivi.

Più difficoltosa invece si presenta il rilievo di forme di degrado che si manifestano con fessurazioni, distacchi ed espulsione di materiale. Queste, infatti, possono essere riconducibili a molteplici cause spesso non individuabili ad occhio nudo durante l'ispezione visiva della costruzione ma piuttosto tanto da necessitare un approfondimento mediante prove diagnostiche da condursi in situ o in laboratorio su campioni prelevati appositamente.



A titolo esemplificativo in presenza di distacchi superficiali di strati di intonaco applicati su elementi in c.a. potrebbe essere necessario capire se le forme di distacco sono riconducibili, ad esempio, a un'eccessiva rigidità dell'intonaco che ha esaltato lo stato tensionale indotto sia dall'impedimento al ritiro che dalle variazioni termiche. In questo caso potrebbe essere opportuno valutare l'adesione dell'intonaco al substrato oltre che alle caratteristiche meccaniche residue.

Nel caso di corrosione di barre di armatura accompagnate da ruggine sulla superficie del cls, fessurazione e distacco del copriferro sarà necessario individuare innanzitutto se vi sono errori nella progettazione della raccolta e smaltimento dell'acqua. In seguito, si potrà procedere alla valutazione dello spessore di calcestruzzo contaminato dall'anidride carbonica e/o dal cloruro e attraverso metodi colorimetrici. I risultati delle analisi unitamente alle informazioni riguardanti l'età della struttura e le caratteristiche del calcestruzzo potranno meglio indirizzare l'intervento di manutenzione più efficace.



In definitiva il sopralluogo di una costruzione esistente rappresenta il primo passo fondamentale per conseguire l'obiettivo di messa in pristino delle strutture e dei materiali. Il tecnico non dovrà limitarsi solo a una mera osservazione visiva delle forme di alterazione e/o degrado e/o dissesto ma anzi dovrà ricercare anche le manifestazioni macroscopiche non direttamente visibili se non attraverso indagini mirate. Durante il sopralluogo, infatti, il professionista dovrà elaborare un preliminare sospetto diagnostico sulla base del quale indirizzerà le attività dell'esame visivo.

Ai fini dell'elaborazione della pre-diagnosi è bene acquisire tutte le informazioni inerenti la costruzioni e che possono avallare il sospetto stesso che il tecnico avrà elaborato in sede di sopralluogo.

5.1.1.2 Raccolta di dati storico-geografici

Questa fase, tipicamente di carattere autoptico, prende avvio con la ricerca e la raccolta di documenti disponibili sull'opera edilizia, a partire dalla prima costruzione fino alle relazioni delle strutture ultimate o di collaudo. L'analisi storica si propone di comprendere le tecniche costruttive utilizzate, di quantificare i dissesti e la consistenza del quadro fessurativo e di ricostruirne la genesi, di datare l'insorgere di fenomeni di degrado, di individuare e storicizzare gli interventi e le manipolazioni antropiche che possono aver variato l'assetto originale determinandone la condizione attuale e le tecniche costruttive usate.

A seconda della tipologia dell'opera, del tipo di "patologia" presente oltre che all'ambiente in cui la costruzione è situata, andrà condotta una ricerca documentale mirata alla raccolta di specifici dati.

La documentazione può fornire informazioni importanti relativamente a:

- Età di costruzione
- Collocazione geografica del sito e condizioni climatiche
- Tecniche, regole e, se esistenti, norme tecniche dell'epoca della costruzione;
- Aspetti esecutivi
- Aspetti urbanistici e storici
- Materiali utilizzati
- Assetto originario e successive modifiche;

Tra i dati elencati riveste una particolare importanza l'età di costruzione. Questo dato diventa decisivo qualora dall'esame visivo si riscontra che la costruzione soffra, ad esempio, di problemi di corrosione con espulsione del copriferro. In quel caso proprio in base alla conoscenza del periodo in cui è stata realizzata l'opera si potrebbe risalire per via indiretta alla qualità dei materiali utilizzati e ai criteri di progettazione utilizzati.

Allo stesso modo prendendo in esame la collocazione geografica e le condizioni climatiche dell'area dove la costruzione è stata costruita è facilmente intuibile che si tratta di un'informazione strettamente legata ai possibili meccanismi di degrado promossi dalle sostanze presenti in ambienti definiti aggressivi. Si prenda in esempio una costruzione che presenta ferri corrosi a vista e macchie di ruggine estese, diventa indispensabile analizzare la sezione in c.a. e il materiale interessato dal degrado per comprendere se il danneggiamento registrato è da associare alle materie prime inquinate o da un'errata progettazione del copriferro oppure se è l'azione dell'ambiente aggressivo (presenza di anidride carbonica e/o e cloruri nell'aerosol marino) l'unica responsabile dello stato di degrado rilevato. Dalle informazioni relative al luogo di ubicazione dell'opera scaturiscono le scelte sui materiali da utilizzarsi nell'intervento di ripristino.

L'analisi storica nel caso più semplice consiste nel reperimento della documentazione tecnica depositata presso gli uffici che operano il deposito e la custodia (Genio Civile, Uffici Tecnici comunali o delle PP.AA.) o nel caso di edifici privati presso gli stessi proprietari. Generalmente tale documentazione comprende: :

- Progetto;
- Relazione a strutture ultimate
- Certificato di collaudo

Nel caso di edifici edificati prima del 1971 la ricerca documentale diventa più complessa e spesso si rende necessario rivolgersi agli archivi storici.

La conoscenza della storia di una costruzione esistente unitamente all'esame visivo della stessa costituiscono un'attività fondamentale del processo diagnostico che non può essere bypassata. Esse, infatti, se ben eseguite forniscono al tecnico un numero di dati sufficienti per poter formulare una pre-diagnosi che lo indirizzerà nella scelta delle tecniche diagnostiche più adeguate e delle zone dell'edificio più idonee su cui poterle eseguire. Poiché le indagini sia distruttive che non hanno un costo, è evidente che ogni singola scelta deve essere opportunamente valutata e finalizzata ai risultati che si intendono ottenere.

In definitiva una diagnosi preliminare ben svolta consentirà da una parte di programmare il tipo di indagini strumentali e la loro numerosità e, di non secondaria importanza, di verificare, inoltre, la fattibilità tecnica, legata a problemi logistici, delle indagini programmate.

5.2 SECONDA FASE: INDAGINI IN SITU

Negli ultimi anni sono state messe a punto numerose tecniche di indagine non distruttive o parzialmente distruttive per la valutazione dello stato di salute e consistenza delle strutture. Alcune di queste derivano da quelle già applicate da tempo nell'ambito di altre discipline scientifiche come per esempio nel campo medico.

Le indagini in situ hanno lo scopo di integrare le informazioni acquisite nella fase preliminare del sopralluogo al fine di confermare o meno il sospetto diagnostico formulato dal tecnico. Un altro settore in cui tali indagini trovano ampia applicazione è quello del monitoraggio dello stato e dell'efficacia di interventi di manutenzione effettuati in passato.

Il vantaggio principale delle prove non distruttive è quello di poter analizzare la struttura nella sua globalità in maniera semplice e sufficientemente rapida. Inoltre, fatta salva la loro corretta applicazione, le indagini non distruttive consentono di ridurre il numero di prove distruttive imposte da Normativa.

Il prelievo di campioni, sia nel caso di carote di cls sia nel caso di prelievi di barre di armatura, comporta sempre un danneggiamento irreversibile alla struttura, che, nel caso delle armature, non restituisce alle volte, una qualità adeguata al danneggiamento causato. Le NTC consentono quindi una riduzione del numero di prelievi nella misura non superiore del 50% che devono essere sostituiti da almeno il triplo di prove con tecniche non distruttive.

Le indagini diagnostiche maggiormente in uso possono classificarsi secondo lo schema riportato in tabella:

MECCANICHE	ULTRASONICHE	ELETTROMAGNETICHE	CHIMICHE	ENDOSCOPICHE	COMBinate
Sclerometriche	Soniche	Termografia	Determinazione profondità carbonatazione	Endoscopiche	A due parametri (SonReb)
Penetrometriche	Ultrasuoniche	Radar	Determinazione contenuto ioni cloruro		
Estrattive (Pull-out)	Tomografia acustica	Radiografiche Radioscopiche			
Trazione superficiale (Pull-off)	Emissione acustica	Tomografia radiografica			
Flessione superficiale (Break-off)		Rilevazioni elettromagnetiche			
Martinetti Piatti					
Prelievo di campioni					

Tabella 6 - Schema delle indagini diagnostiche maggiormente effettuate

Di questi verranno approfondite nel seguito quelle impiegate nella valutazione del degrado e del livello di sicurezza delle costruzioni in conglomerato cementizio armato.

I metodi di valutazione non distruttivi o parzialmente distruttivi disponibili che possono essere utilizzati in situ o in laboratorio per valutare la proprietà e condizioni fisiche dei materiali strutturali sono riassunti nella *Tabella 7* fornita dalla Normativa ACI 364, la quale fornisce una guida per la valutazione delle proprietà del conglomerato cementizio armato di edifici esistenti.

PROPRIETÀ CHIMICHE E FISICHE	IMPATTO ACUSTICO	TEST CONTENUTO D'ARIA	TEST CONTENUTO DI CEMENTO	TEST CHIMICI	CAROTAGGI	MISURA POTENZIALE ELETTRICO	MISURE DI RESISTENZA ELETTRICA	TESTS FLESSIONALI	CICLI DI GELO E DISGELO	RAGGI GAMMA	MISURATORE NUCLEARE DI UMIDITÀ	TEST DI PERMEABILITÀ	ANALISI PETROGRAFICA	PULL OUT	PROVE SCLEROMETRICHE	INDAGINI ULTRASONICHE
Acidità				X									X			
Contenuto d'aria		X											X			
Reazione alcali-carbonati													X			
Reazione alcali-silicati													X			
Contenuto di cemento			X	X									X			
Composizione chimica				X									X			

Contenuto di cloruro				X	X								X			
Resistenza a compressione					X									X	X	X
Contaminazione aggregati				X									X			
Contaminazione acqua				X									X			
Corrosione ambientale				X		X										
Creep					X											
Densità					X					X						
Elongazione					X											
Gelività													X			
Modulo di elasticità					X											X
Modulo di rottura					X		X									
Contenuto di umidità					X		X			X						
Permeabilità												X	X			
Resistenza Pull-out														X		
Qualità degli aggregati													X			
Resistenza gelo-disgelo					X				X				X			
Solidità					X					X			X			
Fessurazione					X											
Resistenza ai solfati				X												
Resistenza a trazione					X			X								
Uniformità	X												X		X	
Rapporto acqua/cemento													X			

Tabella 7 – Stima delle proprietà del calcestruzzo

(Fonte: Normativa ACI 364)

CONDIZIONI FISICHE	Emissioni Acustiche	Impatto Acustico	Test Chimici	Carotaggi	Fibre Ottiche	Raggi Gamma	Termografia Infrarossi	Prove Di Carico	Analisi Petrografica	Misure Fisiche	Indagini Radar	Prove Sclerometriche	Indagini Ultrasoniche	Ultrasuoni Echo	Ispezioni Visive	Windsore Probe
Bleeding channels									X						X	
Degrado chimico			X						X						X	
Corrosione acciaio			X	X					X						X	
Fessurazioni	X	X		X	X		X		X	X	X		X	X	X	

Proprietà delle sezioni			X		X				X			X			
Delamination		X	X	X	X	X		X		X		X	X	X	
Decolorazione			X					X						X	
Disgregazione			X		X	X		X				X		X	
Distorsione														X	
Efflorescenze			X					X						X	
Erosione								X						X	
Danno gelo/disgelo								X						X	
Honeycomb			X	X	X	X		X				X		X	
Popouts														X	
Scrostamento														X	
Spalling			X		X	X								X	
Stratificazione		X			X									X	
Prestazione strutturale	X							X						X	
Uniformità del calcestruzzo					X			X			X	X		X	

Tabella 8 - Valutazione delle condizioni fisiche del calcestruzzo

(Fonte: Normativa ACI 364)

Le indagini attualmente in uso sia non distruttive (magnetometriche, ultrasoniche ecc.) che semi distruttive (saggi, ispezioni locali, ecc.) si basano sull'individuazione di alcune proprietà fisiche (contenuti di umidità, potenziale libero di corrosione ecc.) ed elasto-meccaniche (resistenza a compressione, resistenza a trazione, modulo elastico, ecc.) dei materiali oppure sull'individuazione di sezioni di elementi in c.a. che presentano danneggiamenti (fessure, vespai, riprese di getto, ecc.).

CONDIZIONI FISICHE	Emissioni Acustiche	Analisi chimiche	Test sul Rivestimento	Indagini pacometriche	Misura del potenziale elettrico	Raggi Gamma	Misure fisiche	Indagini radar	Test di tensione	Ultrasuoni Echo	Ispezione visiva
Adesione rivestimento epossidico			X								
Ancoraggio							X				
Prova di piegatura							X				
Resistenza a rottura									X		
Contenuto di carbonio		X									

Composizione chimica		X	X								
Proprietà del rivestimento		X									
Spessore del copriferro				X		X	X	X			
Continuità del rivestimento epossidico			X								
Corrosione					X		X				X
Proprietà delle sezioni							X				
Deformazione							X				X
Elongazione									X		
Esposizione											X
Posizione armature	X			X		X	X	X			
Riduzione delle sezioni									X		
Forma							X				
Resistenza dei collegamenti							X				
Resistenza a trazione									X		
Spessore del rivestimento			X								
Resistenza a taglio delle saldature							X				
Tensione di snervamento									X		

Tabella 9 - Individuazione delle proprietà fisiche delle armature metalliche

(Fonte: Normativa ACI 364)

Nel seguito per ognuna delle principali tecniche di indagine in situ si riportano le principali finalità e informazioni che dalle stesse possono essere acquisite, affrontando successivamente ogni tecnica nel dettaglio.

FINALITÀ	TECNICA DI INDAGINE
Determinazione del diametro della posizione delle barre di armatura e del copriferro	INDAGINE MAGNETOMETRICA
Valutazione adesione di intonaci e rivestimenti o di strati di malta e rasatura	PULL-OFF
Individuazione del telaio in c.a. di aperture chiuse o aperte successivamente alla costruzione, localizzazione di zone umide	TERMOGRAFIA AD INFRAROSSI
Determinazione delle caratteristiche elasto-meccaniche del calcestruzzo	INDAGINE SCLEROMETRICA
	INDAGINE ULTRASONICA
	TOMOGRAFIA SONICA
	METODI SON-REB
	PULL-OUT
	PROVE DI COMPRESSIONE SU CAROTE
Individuazione danneggiamento sezione per vespaio e/o nidi di ghiaia	INDAGINE SCLEROMETRICA
	INDAGINE ULTRASONICA
Profondità delle riprese di getto e delle fessure	INDAGINE ULTRASONICA

Fronte di avanzamento della CO ₂ e del Cl ⁻	INDAGINE COLORIMETRICHE ANALISI CHIMICA ELEMENTARE
Profondità delle riprese di getto e delle fessure	INDAGINE ULTRASONICA
Valutazione della corrosione delle barre di armatura	MAPPATURA DI POTENZIALE E DI RESISTIVITÀ ELETTRICA
Fronte di avanzamento del solfato	ANALISI CHIMICA ELEMENTARE
Natura del deposito del particolato atmosferico	ANALISI CHIMICHE ELEMENTARE DIFFRAZIONE RX
Valutazione del degrado promosso da cause chimiche (solfato, zolfo, H ₂ S, ecc.)	ANALISI CHIMICHE ELEMENTARE
	DIFFRAZIONE RX
	MICROSCOPIA ELETTRONICA
Individuazione di forme alcali-reattive e di bordi di reazione all'interfaccia pasta-aggregato	ANALISI CHIMICHE ELEMENTARE
	MICROSCOPIA OTTICA
	MICROSCOPIA ELETTRONICA
Motivazioni di stacco strato di usura pavimentazioni	ANALISI CHIMICHE ELEMENTARE
	MICROSCOPIA OTTICA
Natura e genesi efflorescenze e subflorescenze	DIFFRAZIONE RX
Natura macchie, disuniformità cromatiche e di dilavamento superficiale	MICROSCOPIA OTTICA
Indicazioni sulle qualità del calcestruzzo	MICROSCOPIA OTTICA
	POROSITÀ PER ASSORBIMENTO ACQUA
Valutazione dell'umidità del materiale	IGROMETRO A CARBURO O ELETTRONICO
	MEDIANTE STUFA
Valutazione danneggiamento a seguito di un incendio	ANALISI TERMICA

Tabella 10 - Tecniche di indagine utilizzate in base alla finalità

5.2.1 Prova magnetometrica

Come riportato in *Tabella 10* questa tecnica è utilizzata allo scopo di individuare, in maniera non invasiva, la presenza e l'orientamento delle armature principali e secondarie (staffe) in un getto di conglomerato cementizio armato. Si può, pertanto utilizzare questo strumento prima di procedere all'estrazione di carote dall'elemento di calcestruzzo, al fine di ottenere provini privi di armature all'interno, onde ridurre l'influenza della stessa sul risultato della prova di schiacciamento ed evitando al contempo di danneggiare le barre d'acciaio.

Nei modelli più recenti e aggiornati lo strumento consente non solo di individuare e localizzare le barre ma anche di stimarne il diametro e lo spessore del copriferro in calcestruzzo. La determinazione di questi dati può essere utile sia nella stima dell'eventuale pericolosità delle lesioni presenti in una membratura, nella verifica strutturale delle sezioni in c.a. oltre che nella stima della vita residua di un'opera.

5.2.1.1 Principio di funzionamento

Il magnetometro (detto anche pacometro) si basa sul principio dell'induzione elettromagnetica, sfruttando le proprietà magnetiche del ferro, secondo il quale la presenza di un conduttore metallico (la barra di armatura) in un campo elettromagnetico ne altera il potenziale. Si sfrutta questo principio facendo scorrere una sonda capace di generare un campo elettromagnetico sulla superficie della membratura in calcestruzzo armato, quando una armatura o un altro oggetto metallico si trova all'interno di questo campo, le linee di forza vengono distorte. Il disturbo causato dalla presenza del metallo a sua volta produce un cambiamento locale nella forza di campo elettromagnetico, come rilevato dalla sonda e indicato dal contatore.

L'interferenza della sonda con una barra di armatura viene segnalata da una variazione di potenziale ed evidenziata dallo strumento mediante un segnale acustico più o meno intenso a seconda dell'orientamento e della vicinanza della barra.

La ricerca è influenzata sia dall'orientamento sia dalla vicinanza del metallo. È quindi possibile individuare le barre d'armatura e determinare il loro orientamento. Con opportune calibrazioni può essere stimato sia lo spessore del copriferro sia il diametro della barra.

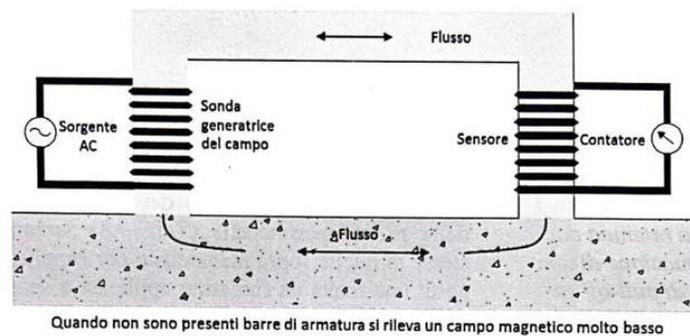


Figura 29- Meccanismo di funzionamento schematico del magnetometro

(Fonte: *Il restauro dell'architettura moderna in cemento armato*, 2019)

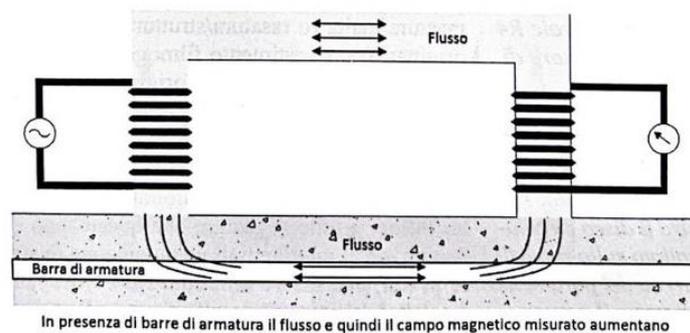


Figura 30 - Meccanismo di funzionamento schematico del magnetometro

(Fonte: *Il restauro dell'architettura moderna in cemento armato*, 2019)

5.2.1.2 Riferimenti normativi

Le indagini magnetometriche sono governate dalla normativa BS 1881: Part 204:1998 – “*Testing concrete. Recommendations on the use of electromagnetic covermeters*” la quale fornisce raccomandazione e descrive i principi di funzionamento dei dispositivi elettromagnetici che possono essere utilizzati per individuare le barre di armatura annegate nel calcestruzzo. Descrive anche i principali metodi di utilizzo, l’accuratezza prevedibile e i fattori che possono influenzare i risultati.

5.2.1.3 Apparecchiatura

Lo strumento è dotato di un’unità di elaborazione ad emissione acustica del segnale del campo elettromagnetico a cui sono collegate una o più sonde emittenti-riceventi il campo elettromagnetico. Nei pacometri più recenti, l’unità di elaborazione è corredata di display digitale che permette di visualizzare in loco i dati raccolti.

5.2.1.4 Preparazione dell’area di indagine

Per non ostacolare lo scivolamento della sonda prima dell’inizio dell’attività di prova è opportuno provvedere alla pulizia e la lisciatura della superficie da indagare

5.2.1.5 Procedura di indagine

La sonda viene disposta con l’asse longitudinale parallelo alla direzione presunta dell’asse delle armature principali, muovendo la sonda lungo la superficie dell’elemento da indagare ed in direzione perpendicolare a quello delle armature ricercate.

Individuata e segnata sulla superficie di indagine la posizione delle armature principali si ricercano le barre d’armatura nella direzione ortogonale alla precedente.

Si procede fino ad ottenere la mappatura completa dei ferri di armatura.

Nel caso in cui venga richiesto dalla committenza si può procedere alla stima dello spessore del copriferro e alla stima del diametro delle barre di armatura.

Nel caso in cui si disponga dello strumento munito di display digitale, prima di iniziare la prova, viene disposto e fissato sull’elemento da indagare un foglio di polietilene su cui è riportato reticolo di riferimento avente le maglie della dimensione massima di lettura del pacometro. si esegue la scansione delle righe e delle colonne del reticolo e i dati vengono successivamente trasferiti al monitor dove è possibile visualizzarne la restituzione grafica.

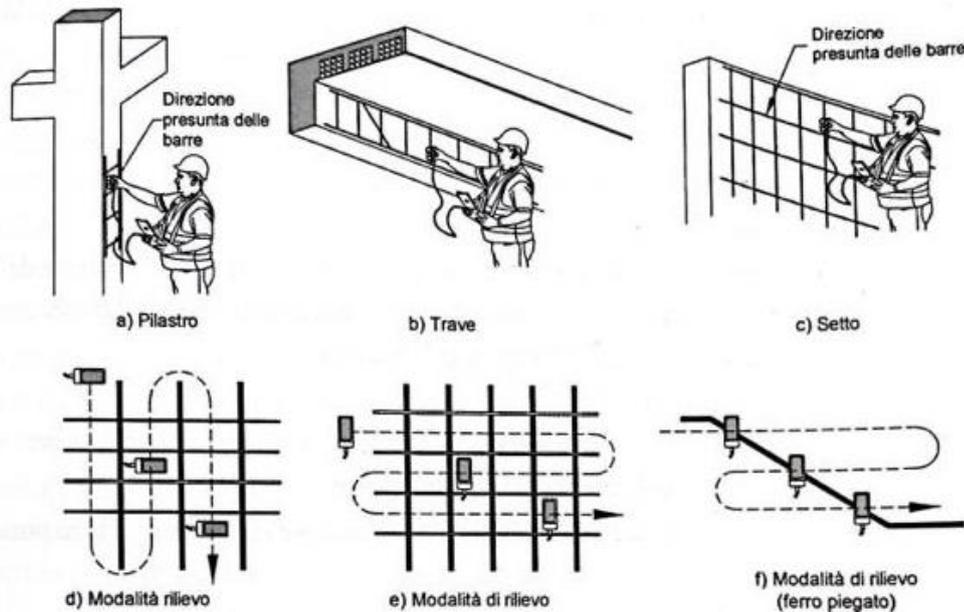


Figura 31 - Esecuzione dell'indagine magnetometrica

(Fonte: *Il controllo strutturale degli edifici in cemento armato e muratura*, 2010)

5.2.2 Prova Pull-off

5.2.2.1 Finalità della prova

La prova di pull-off (o di adesione) è una tecnica di indagine semi-distruttiva che permette la misura della resistenza a staccatura o della resistenza allo strappo di un substrato o di materiali applicati su di esso a spessore sottile. Questa tecnica si presta per la valutazione della qualità e dell'adesione di rasature, intonaci, malte, rivestimenti protettivi filmogeni o di tipo ceramico, in vetro o pietra, per stabilire l'adesione di uno strato di malta utilizzato nella ricostruzione di un elemento in ca degradato o danneggiato o per stimare la resistenza allo strappo del substrato stesso.

Questo tipo di indagine risulta particolarmente utile in quanto, in base al valore della resistenza a strappo ma soprattutto alle modalità di collasso è possibile stabilire quale sia l'anello debole della catena in un sistema multistrato. Questa necessità si riscontra quando ad esempio si vuole valutare la qualità delle applicazioni realizzate per la ricostruzione e il rinforzo di un elemento danneggiato.

Infine, è utile segnalare che questo tipo di indagine negli interventi di manutenzione può essere utilizzata sia in fase di collaudo del lavoro che nella fase preliminare che precede l'esecuzione degli stessi al fine di validare sia la tecnica che i materiali prescelti per l'intervento di manutenzione.

5.2.2.2 Riferimenti normativi

UNI EN 1015-12, *Metodi di prova per malte per opere murarie – Parte 12: Determinazione dell'aderenza al supporto di malte da intonaco esterno ed interno;*

UNI EN 1542, *Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo – Metodi di prova – Misurazione dell'aderenza per trazione diretta;*

ASTM D4541-09, *Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coating Using Portable Adhesion Testers.*

5.2.2.3 Apparecchiatura

L'Apparecchiatura id prova pull-off è costituita da:

- Telaio di contrasto;
- Moltiplicatore di forza a funzionamento idraulico;
- Dinamometro che visualizza e memorizza il carico applicato;
- Adesivo epossidico-bicomponente;
- Tasselli di ancoraggio in alluminio

5.2.2.4 Procedura di indagine

Il procedimento della prova consiste nell'incidere la superficie dello strato di materiale da indagare mediante carotaggio, realizzando un'incisione circolare di diametro 50 mm avente profondità tale da raggiungere il substrato sul quale lo strato di materiale è stato applicato. Si procede, quindi, incollando sulla superficie incisa un disco metallico (di diametro pari all'incisione) sul quale viene applicata, perpendicolarmente alla superficie da esaminare, una forza di trazione per mezzo di un martinetto idraulico dotato di manometro. La prova termina quando:

- *il distacco si manifesta per superamento dell'adesione:* la frattura si colloca all'interfaccia tra lo strato del materiale applicato e il substrato; in questo caso, il valore misurato coincide con la resistenza allo strappo (adesione);
- *si evidenzia la rottura coesiva dello strato di materiale riportato:* la frattura avviene entro lo spessore dello strato di materiale più esterno. In tal caso, l'adesione è maggiore del valore di resistenza a trazione del materiale costituente lo strato più esterno;
- *la rottura coesiva interessa il substrato:* la rottura si colloca nel substrato originario sul quale è stato applicato il materiale a strato sottile. Sia l'adesione, che la resistenza a trazione del materiale costituente lo strato riportato più esterno sono superiori alla resistenza a trazione del substrato.

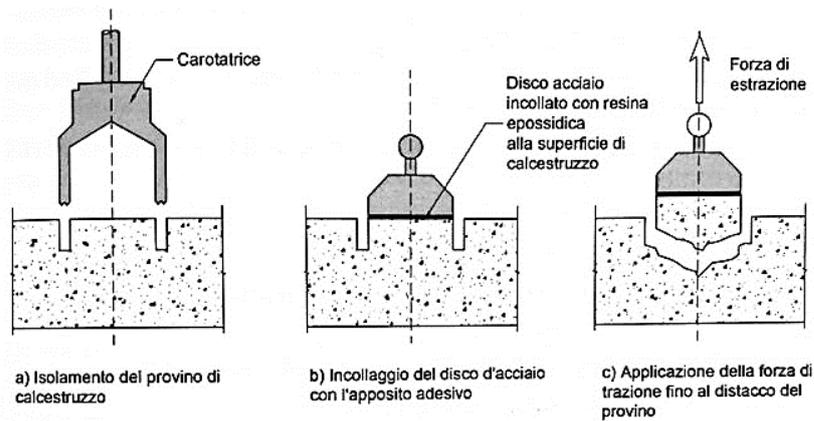


Figura 32 - Esecuzione della prova di Pull

(Fonte: *Il controllo strutturale degli edifici in cemento armato e muratura*, 2010)

5.2.3 Termografia ad infrarossi

5.2.3.1 Principio di funzionamento

Il principio fisico su cui si basa la tecnica termografica è quello dell'emissione da parte di tutti i corpi di radiazione elettromagnetica, nella banda dell'infrarosso (lunghezze d'onda comprese tra 700 nm e 1 mm), in relazione alla propria temperatura.

La termografia si configura come una tecnica di imaging della temperatura superficiale dei corpi. In pratica la termografia permette di visualizzare valori assoluti e variazioni di temperatura. La relazione fra temperatura di un oggetto e quantità di radiazione infrarossa emessa dalla sua superficie è governata da una relazione di diretta proporzionalità definita dalla legge di Stefan-Boltzmann:

$$E = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4$$

Dove

E = emittanza nell'infrarosso (IR), ovvero la potenza emessa per unità di superficie (Watt su metro quadrato $W \cdot m^{-2}$)

σ = costante di Stefan-Boltzmann

ε = emissività del materiale, ovvero frazione di energia irraggiata da quel materiale rispetto all'energia irraggiata da un corpo nero che sia alla stessa temperatura⁴⁴

T = Temperatura assoluta del corpo (misurata in gradi Kelvin, K)

La termografia a infrarossi misura e registra l'energia (radianza) che qualsiasi materiale emette sotto forma di radiazioni elettromagnetiche. La radianza è funzione della quarta potenza della temperatura di un determinato materiale, la quale dipende sia dalle condizioni di esposizione ambientale che dal calore specifico e dalla conducibilità termica del materiale stesso. Pertanto, la termografia a infrarossi consente di rilevare i materiali

che compongono una determinata opera ed indirettamente la presenza di fessure e discontinuità.

5.2.3.2 Riferimenti normativi

L'indagine termografica, condotta in base alle UNI EN 10824-1, UNI 9252, UNI EN 13187, consente di rilevare la radianza emessa dai materiali che compongono una determinata opera mettendo in evidenza le differenze di temperatura (anche minori di 1°C) determinate sia dalla diversa natura dei materiali da costruzione che, per uno stesso materiale, da differenze nel contenuto d'acqua.

5.2.3.3 Finalità della prova

La termografia è in grado di rilevare indirettamente fessure e discontinuità sulla base delle differenze di temperatura presenti sulla superficie del materiale: temperature superficiali maggiori si rileveranno nell'area difettata rispetto a quelle circostanti prive di difetti e più "fredde" se l'irraggiamento interessa la superficie difettata. Per contro, se il flusso di calore dovesse pervenire dalla superficie opposta a quella ove è presente il difetto, la zona al di sopra del difetto si presenterà a temperatura inferiore rispetto alle zone circostanti. Oltre agli scopi appena esposti l'indagine viene eseguita anche allo scopo di rilevare irregolarità di posa di isolamenti degli involucri, rilevazione della tessitura muraria e dei tamponamenti di facciata intonacate o che presentano un rivestimento superficiale continuo, mappatura dell'umidità delle superfici, caratterizzazione dei distacchi dei rivestimenti (per es. dell'intonaco o di affreschi).

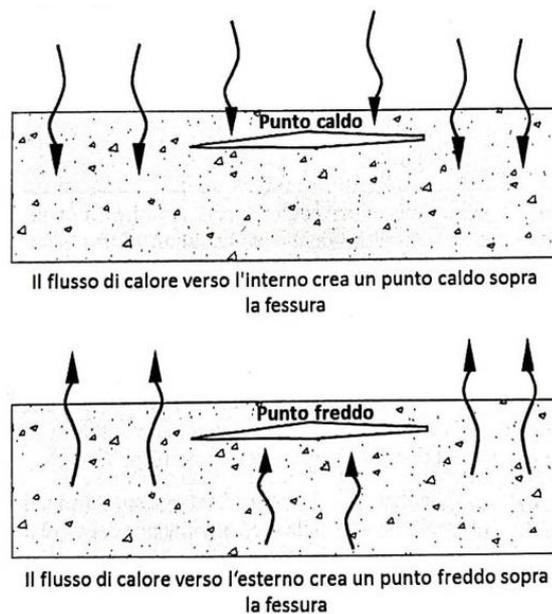


Figura 33 - Principio di funzionamento della termografia a infrarossi

(Fonte: *Il restauro dell'architettura moderna in cemento armato*, 2019)

5.2.3.4 *Apparecchiatura*

La ripresa termografica si effettua mediante l'utilizzo di una termocamera, ovvero una camera fotografica dotata di sensori per la radiazione IR. La camera non fotografa quindi la radiazione visibile riflessa, ma la radiazione infrarossa emessa. L'imaging elaborato può essere in scala di grigi (dal nero al bianco) o in falso colore (dal blu al rosso o dal viola al giallo). La scala cromatica fornisce un'indicazione quali-quantitativa immediata della temperatura rilevata, dalla più fredda alla più calda

La strumentazione è composta da:

- Telecamera a raggi infrarossi che converte mediante uno speciale sistema ottico la radiazione emessa dalla superficie in un segnale elettrico in immagini visibili sul display dello strumento;
- Oscilloscopio che converte il segnale elettrico in immagini visibili sul display dello strumento.

5.2.3.5 *Procedura di indagine*

Per condurre l'indagine termografica si sfrutta per le facciate esterne degli edifici l'energia solare. Per le indagini da effettuarsi all'interno è necessario, invece, che la superficie venga preventivamente irraggiata da una fonte di calore (generalmente lampade UV), in modo da procedere alla rilevazione della radianza nella fase successiva di raffreddamento durante la quale ogni materiale diminuirà la propria temperatura in modo differente a seconda della conducibilità termica che lo contraddistingue.

Si ottiene in questo modo la distribuzione delle temperature superficiali sull'involucro degli edifici ottenuta dalla misura della distribuzione di temperatura apparente di radiazione.

5.2.4 Prove sclerometriche

5.2.4.1 *Principio di funzionamento*

Intorno agli anni '50 Schmidt sviluppò un dispositivo per stimare la resistenza a compressione del calcestruzzo attraverso la misura della durezza superficiale collegata al rimbalzo di una massa battente definita *martello* sulla superficie di un elemento in conglomerato cementizio armato. Lo strumento, grazie al basso costo, alla facilità di utilizzo, oltre alle ridotte dimensioni, ha subito una notevole diffusione e, ad oggi, *l'indagine condotta con lo sclerometro rappresenta quella più conosciuta tra i progettisti.*

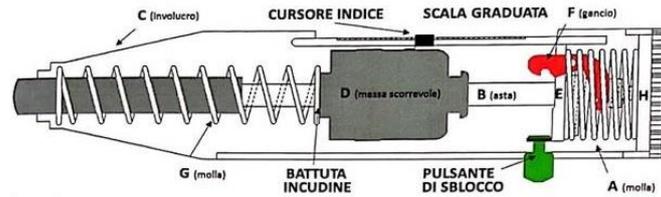


Figura 34 - Sclerometro

(Fonte: *Il restauro dell'architettura moderna in cemento armato*, 2019)

Lo sclerometro consiste in una massa battente di acciaio azionata da una molla che contrasta un'asta di percussione a contatto sulla superficie di prova del calcestruzzo. In posizione di riposo la molla A è indeformata e mantiene l'asta B fuori dall'involucro C che racchiude il meccanismo. Il martello D è agganciato al disco E a mezzo di un gancio a leva F anche la molla G, che pressa sul martello e sulla cassa esterna, è indeformata.

5.2.4.2 Riferimenti normativi

La normativa di riferimento che dà indicazioni sull'uso delle prove sclerometriche per determinare la rigidità e la resistenza di un materiale è la UNI EN 12504-2:2001 – che sostituisce la UNI 9189:1988.

Al punto 1 nota 2 della norma si legge che il metodo ha lo scopo di determinare la resistenza alla compressione del calcestruzzo ma può essere usato anche per stimare la resistenza in sito in modo da capire quali sono le zone strutturali in cui è presente calcestruzzo di scarsa qualità o deteriorato.

5.2.4.3 Apparecchiatura

La strumentazione è costituita da:

- Sclerometro
- Incudine di taratura
- Pietra abrasiva

5.2.4.4 Preparazione dell'area di indagine

La prova va effettuata quando la struttura è al rustico cioè senza la presenza di finiture quali intonaci, pavimenti, ecc.

Il primo passo è individuare le membrature (pilastri, travi, ecc.) oggetto delle misure sclerometriche. Sulla membratura oggetto di verifica, prima di ogni misurazione si effettua la pulizia della superficie di indagine utilizzando ad esempio una spazzola abrasiva o una mola. Si può ricorrere preventivamente ad una prova pacometrica al fine di individuare le aree non interessate da armature in prossimità della superficie. Inoltre l'area di prova deve essere priva di difetti superficiali quali nidi di ghiaia, forti porosità e

rilevanti irregolarità. Al fine di ottenere un valore attendibile dell'indice sclerometrico relativo a una determinata area di un elemento in ca si disegna sulla superficie da saggiare, una griglia regolare costituita da non meno di 9 distanti $20 \div 50$ mm (di norma 30 mm) tra loro (e dal bordo di eventuali difetti superficiali presenti o da ferri d'armatura preventivamente rilevati).

5.2.4.5 Procedura di indagine

Per eseguire la prova si dispone l'apparecchio perpendicolarmente alla superficie del getto, con l'estremità dell'asta B in contatto con la superficie. Esercitando una pressione sullo strumento, l'asta rientra sull'involucro e sposta la massa scorrevole verso il fondo, caricando allo stesso tempo le molle. Quando l'asta B tocca il perno H questo fa scattare il gancio F che libera la massa mobile e la proietta contro l'incudine. Dopo l'urto il martello rimbalza e trascina un indice mobile lungo una scala graduata. La lettura è espressa da un numero intero (indice di rimbalzo) compreso tra 1 e 100 che esprime la lunghezza di rimbalzo in percentuale rispetto alla corsa. Maggiore è l'indice di rimbalzo, più alta la durezza della superficie dell'elemento in calcestruzzo e quindi in linea di massima più elevata la resistenza a compressione del conglomerato cementizio.

L'indice di rimbalzo dell'area sottoposta ad indagine sarà ottenuto dalla media aritmetica dei nove (o più) valori determinati tenendo anche presente che se più del 20% delle misure effettuate si discosta dalla media per più di sei unità deve essere scartata l'intera serie dei valori dei singoli indici di rimbalzo e procedere ad individuare una nuova area sulla quale effettuare una nuova campagna di misurazioni.

Per ogni serie di misurazioni normalmente si scartano i due valori maggiori e si mediano i rimanenti ottenendo così l'indice di rimbalzo medio I_m .

I risultati delle prove possono considerarsi accettabili quando almeno l'80% degli indici di rimbalzo I si discosta da I_m per meno di 6 unità, altrimenti deve essere scartata l'intera serie di misure e la prova va ripetuta in una zona adiacente.

5.2.5 Determinazione del potenziale di corrosione

5.2.5.1 Finalità della prova

La misura del potenziale di corrosione libera, noto anche come potenziale di semi-cella (HCP Half-Cell Potential) è finalizzata alla valutazione della probabilità di corrosione delle armature in acciaio al carbonio in strutture in c.a..

L'acciaio a contatto con il calcestruzzo sano si trova in una forma stabile, protetto da un ossido passivante, stabile a pH circa 13, tipico della matrice cementizia. Esistono tuttavia delle circostanze in cui lo strato passivante può venir meno, in

particolare in caso di carbonatazione del copriferro o in presenza di cloruri. La depassivazione del metallo segna l'inizio dell'attività elettrochimica nel sistema, che procede fintantoché vi sia presenza di umidità e disponibilità di ossigeno. Il rinforzo metallico si comporta così come una pila, in cui coesistono zone anodiche dove il metallo viene ossidato e zone catodiche dove si hanno le reazioni di riduzione di ossigeno e acqua. Il passaggio di corrente avviene per trasporto di elettroni nel corpo del metallo, e per trasporto di specie ioniche nella soluzione che permea le porosità del calcestruzzo. Questo flusso di corrente è accompagnato da una variazione del potenziale elettrico tra diverse zone del rinforzo: le zone anodiche saranno caratterizzate da valori di potenziale minori (più negativi) mentre quelle catodiche avranno potenziali maggiori.

5.2.5.2 Principio di funzionamento

Il metodo consiste nella determinazione della tensione esistente fra gli elettrodi di una pila costituita dall'interfaccia armatura/calcestruzzo e da un elettrodo di riferimento appoggiato alla superficie del calcestruzzo. Lo schema elettrico è il seguente:

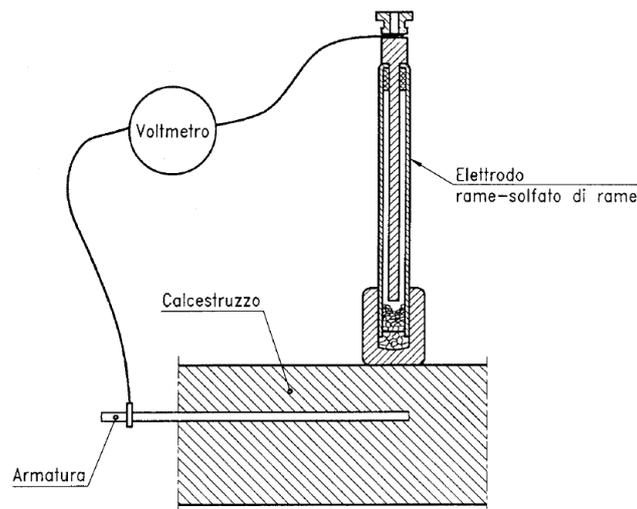


Figura 35 - Schema elettrico della prova del potenziale di corrosione

(Fonte: *Patologia e diagnostica del cemento armato*, 2005)

Nel caso di armature di acciaio al carbonio, si individuano gli intervalli di potenziale riportati nel grafico in *Figura 35*.

La determinazione del potenziale di corrosione può determinarsi:

- per singola barra;
- su ogni superficie prescelta dello stesso elemento strutturale, purché vi sia la certezza che le varie parti dell'armatura sottostanti la superficie siano collegate metallicamente tra di loro

Per le determinazioni su una singola barra il collegamento elettrico deve eseguirsi sulla barra da esaminare. Per le determinazioni su superfici (individuazione delle linee di

isopotenziale) il collegamento elettrico può essere effettuato su qualsiasi punto dell'armatura sottostante la superficie prescelta.

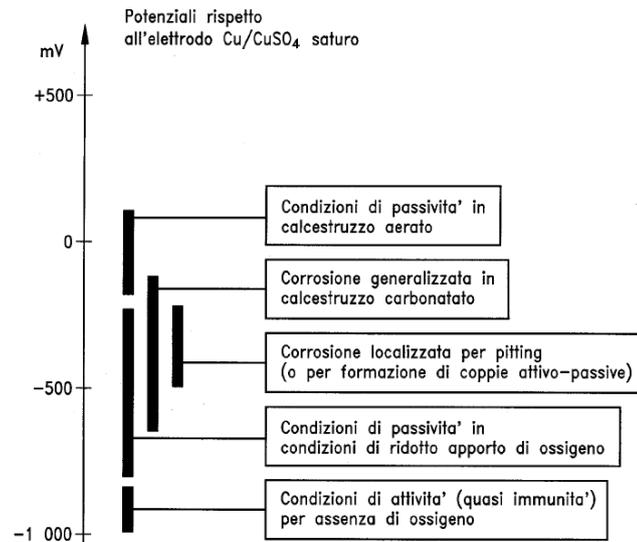


Figura 36 - Intervalli di potenziale per armature in acciaio al carbonio

(Fonte: Patologia e diagnostica del cemento armato, 2005)

5.2.5.3 Riferimenti normativi

Le norme di riferimento per la misura del potenziale delle armature (ASTM C876 e UNI 10174:1993) descrivono la tecnica di misura del potenziale di semi-cella ed indicano i criteri di valutazione del rischio di corrosione. In accordo con queste normative, la probabilità di corrosione viene correlata alla misura del potenziale nel modo che segue:

- probabilità di corrosione inferiore a 10% per potenziali

5.2.5.4 Apparecchiatura

L'apparecchiatura di misura è costituita da quanto segue:

- elettrodo di riferimento (Cu/CuSO₄ saturo): consiste in una semipila caratterizzata da una reazione di elettrodo, cui deve corrispondere un potenziale indipendente dall'ambiente con il quale è a contatto ed invariabile nel tempo ad una data temperatura.

E' costituito generalmente da un contenitore rigido di materiale isolante non reattivo con il solfato di rame (vetro, PVC, etc), da un tappo poroso che resta umido per azione capillare, da una barretta di rame immersa in una soluzione satura di solfato di rame

- elettrodo di riferimento: a calomelano saturo (ECS)
- voltmetro: con precisione non minore della classe 3 (errore $\leq 3\%$ del fondo scala), con resistenza di ingresso non minore di 10M Ω

5.2.5.5 Preparazione dell'area di indagine

Una volta individuato l'elemento su cui svolgere la prova bisogna procedere alla scarifica dell'intonaco e di ogni altro rivestimento eventualmente presente per lasciare libera la superficie in cls. Si traccia una griglia regolare di punti sulla superficie, si inumidisce la superficie con una soluzione di acqua potabile contenente lo 0,5% di un tensioattivo liquido per ridurre l'evaporazione e si mette a vista una parte di barra di armatura cui collegare il polo positivo del voltmetro.

5.2.5.6 Procedura di indagine

L'indagine si effettua collegando la barra d'armatura al polo positivo di un voltmetro ad elevata impedenza, mentre al polo negativo si collega l'elettrodo di riferimento (generalmente rame-solfato di rame: Cu/CuSO_4 o CSE). L'elettrodo consiste in una barretta di rame immersa in una soluzione satura di solfato di rame e da un setto poroso che deve essere appoggiato a contatto con la superficie del manufatto oggetto di indagine. Tra l'elettrodo e la superficie della struttura in c.a. si interpone una sugna umida per garantire la continuità elettrolitica tra la soluzione contenuta nell'elettrodo e il calcestruzzo, oppure si bagna l'intera superficie dell'elemento in c.a.. L'indagine deve essere condotta su superfici che non presentano delaminazioni, presenza di materiale incoerente o difetti.

Tale metodo, se da un lato non fornisce alcuna informazione quantitativa né sulla velocità di corrosione né sull'entità del danno che si è già prodotto, è particolarmente adatto per una prima definizione della mappa isopotenziale con cui identificare le zone di passività e basso rischio corrosivo e macrocoppie.

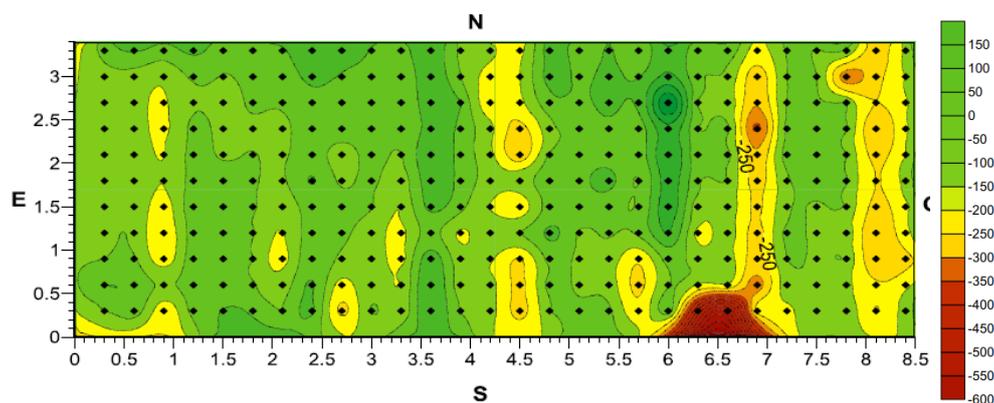


Figura 37 - Determinazione della corrosione tramite mappatura

Secondo le specifiche ASTM sono da considerare non affette da corrosione con una confidenza del 90% quelle regioni dove il potenziale letto sia meno negativo di -200mV , mentre con la stessa probabilità le zone con potenziali più negativi di -350mV

corrispondono a siti anodici dove la corrosione è attiva. Successive revisioni nate dall'esperienza di vari operatori suggeriscono che il valore corrispondente alla depassivazione dell'acciaio (innesco del fenomeno corrosivo) sia di circa -240mV, che è diventato quindi il valore soglia adottato dall' "American Federal Highways Administration".

Potenziale misurato (vs. CSE)	Probabilità di corrosione
$E > -200 \text{ mV}$	$< 10\%$
$-350 < E < -200 \text{ mV}$	$\approx 50\%$
$E < -350 \text{ mV}$	$> 90\%$

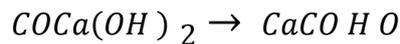
Tabella 11 - Criteri per l'interpretazione del potenziale elettrico di corrosione

(Fonte: ASTM C876)

5.2.6 Rilievo colorimetrico della carbonatazione

La riduzione dell'alcalinità del calcestruzzo può essere causata dalla circolazione di acqua pura o leggermente acida, o alla reazione dei composti di carattere basico $NaOH$, KOH , $Ca(OH)_2$ della fase acquosa del calcestruzzo con i componenti acidi dell'atmosfera. Quello che maggiormente è presente fra questi è l'anidride carbonica (CO_2), ed è proprio per questo motivo che la riduzione di alcalinità viene definita con il termine carbonatazione.

La reazione di carbonatazione in soluzione acquosa si può scrivere sinteticamente come:



L'armatura di acciaio nel calcestruzzo può essere a rischio di corrosione se il copriferro è carbonatato. Per stabilire se ci sia uno spessore sufficiente di calcestruzzo non carbonatato a proteggere l'armatura per il tempo di vita di progetto rimanente della struttura, è necessario determinare la profondità totale del copriferro e la profondità della carbonatazione.

5.2.6.1 Riferimenti normativi

La norma di riferimento sull'analisi della carbonatazione prevede la possibilità di svolgere l'analisi utilizzando metodi differenti. Le procedure normalizzate UNI9944:1992 e UNI EN 14630:2007 descrivono il metodo colorimetrico che utilizza come indicatore la fenoltaleina. La norma di riferimento sull'analisi della carbonatazione prevede la possibilità di svolgere l'analisi utilizzando metodi differenti. La metodologia fino ad oggi più conveniente ed utilizzata per eseguire l'indagine sulla profondità di carbonatazione si basa sull'estrazione di campioni cilindrici (carote), effettuata mediante un'apposita

macchina carotatrice dotata di utensili di perforazione con corona diamantata raffreddata ad acqua. L'utilizzo di questo metodo presenta diversi inconvenienti:

- Difficoltà nell'esecuzione della prova. Il prelievo dei campioni, infatti, richiede l'impiego di un'attrezzatura relativamente costosa che per il peso e le vibrazioni prodotta va fissata al manufatto mediante tasselli di ancoraggio. Il raffreddamento dell'utensile necessita in genere di un continuo flusso d'acqua, con evidenti problemi nel caso di interventi in edifici abitati.

- Elevato rischio di danno alla struttura. Data la capacità dell'utensile di tagliare anche i metalli, non è raro il danneggiamento delle armature, con conseguente riduzione della capacità portante della struttura. Inoltre, occorre considerare la dimensione del foro da ripristinare che varia tra i 25÷100 mm.

- Costo elevato della prova. La tipologia di attrezzature, la lunga durata del prelievo e gli interventi di ripristino della struttura, rendono l'analisi mediante carotatrice molto costosa.

- Limiti di esecuzione. A causa degli elevati inconvenienti, la prova della carotatrice viene effettuata solo su un punto dell'edificio, limitando così una mappatura più completa, e solo su importanti strutture particolarmente danneggiate.

Altri metodi prevedono il prelievo di frammenti di calcestruzzo, qualora il copriferro risulti particolarmente distaccato dall'armatura o il prelievo di polveri per mezzo di trapani a percussione.

5.2.6.2 Principio di funzionamento

La prova consiste nello spruzzare sulla superficie del calcestruzzo una soluzione di fenolftaleina all'1% in alcool etilico. La soluzione utilizzata non è altro che un indicatore di pH: essa si colora di viola nelle zone ove il conglomerato presenta una forte basicità con pH superiore a 12.5 tipico di calcestruzzi non interessati dal fenomeno di degrado da CO₂. Per contro, nelle zone ove il calcestruzzo è stato penetrato dalla CO₂, per effetto della trasformazione dell'idrossido di calcio nel corrispondente carbonato, si ha una parziale neutralizzazione della fase acquosa dei pori capillari il cui pH si attesta su valori inferiori a 11. La soluzione di fenolftaleina in queste zone rimane incolore permettendo, quindi, di individuare le zone interessate dal fronte di avanzamento della CO₂ che costituiscono un potenziale ambiente per la corrosione dei ferri. Questi, infatti, in presenza di acqua e ossigeno possono ossidarsi dando luogo alla formazione di ruggine il cui aumento di volume promuove la comparsa di fessurazioni ed espulsioni del copriferro. La reazione di carbonatazione inizia dalla parte corticale dalla superficie esterna del

calcestruzzo per procedere via via verso le parti più interne. Qualora l'analisi sia effettuata su carote estratte dall'elemento in calcestruzzo è opportuno che la soluzione venga spruzzata sulla superficie laterale della stessa immediatamente dopo l'estrazione.

5.2.6.3 Apparecchiatura

Per eseguire la prova occorre una soluzione contenente l'indicatore di fenolftaleina, solitamente 1 g di fenolftaleina disciolta in 70 ml di alcol etilico e diluita a 100 ml con acqua distillata o deionizzata.

Un contenitore dotato di un uccello per generale uno spruzzo fine di soluzione di indicatore.

Un dispositivo di misurazione per misurare la distanza della superficie del calcestruzzo fino al fronte di carbonatazione, come per esempio un calibro o una riga, in grado di misurare fino al millimetro più vicino.

5.2.6.4 Procedura di indagine

La prova di misura di carbonatazione si esegue solitamente in sito. Le prove in sito possono essere effettuate scalpellando dalla struttura in esame, per esporre un'area adeguata di calcestruzzo rotto di recente. In alternativa, larghi frammenti oppure campioni di carota possono essere asportati dalla struttura.

Se la prova di carbonatazione deve essere eseguita sulla superficie cilindrica della carota appena estratta, è necessario pulire accuratamente la stessa con acqua potabile per rimuovere i detriti dell'operazione di carbonatazione che potrebbero falsare il risultato della prova colorimetrica. In tal caso, ripulita la carota, si spruzza la stessa con la soluzione indicatore di fenolftaleina in quantità appena sufficiente a inumidire la superficie senza colare lungo la superficie. Nel caso in cui le carote siano prelevate con la sola finalità di misurare la profondità di carbonatazione, oppure nel caso non sia possibile effettuare immediatamente la prova, ma la stessa deve essere effettuata in laboratorio, per poter eseguire la prova è possibile tagliare o spezzare carote lungo l'asse longitudinale (con prova brasiliana), e il più vicino possibile lungo il diametro della carota. Le superfici appena rotte devono essere pulite da polvere e particelle sciolte senza utilizzare acqua né abrasione, e devono essere spruzzate con soluzione indicatore di fenolftaleina in quantità appena sufficiente a inumidire la superficie senza colare lungo la superficie. La prova deve essere completata appena possibile dopo aver spezzato la facciata del calcestruzzo. La misura della profondità di carbonatazione e la registrazione della stessa deve avvenire all'atto della modifica del colore in rosso violaceo, che generalmente è istantaneo, e in ogni caso entro 30 secondi dopo la spruzzatura.

La profondità di carbonatazione in un qualsiasi punto è la distanza d_k (misurata in millimetri) dalla superficie esterna del calcestruzzo al confine della regione colorata di rosso violaceo. Poiché il fronte di carbonatazione è irregolare, devono essere misurate, con approssimazione al millimetro più vicino sia la media d_k media sia alla profondità massima d_k max. Se ci sono tasche isolate, per esempio in corrispondenza di fessure, in cui la profondità massima d_k max è in modo significativo maggiore della media d_k media, allora il valore non deve essere compreso nel calcolo di d_k media.

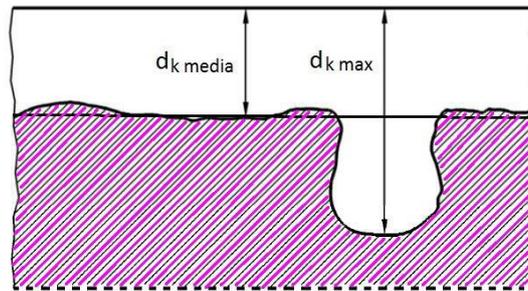


Figura 38 - Determinazione di d_k ,media e d_k ,max

Il valore medio corretto d_k media e la profondità o le profondità massime d_k max devono essere registrati approssimanti al millimetro più vicino, preferibilmente su un disegno o una fotografia.

5.2.6.5 Finalità della prova

Oltre alla determinazione dello spessore di calcestruzzo penetrato dalla CO₂ la misura della profondità di carbonatazione può essere utilizzata per stimare indirettamente le caratteristiche elasto-meccaniche del calcestruzzo. Infatti, la carbonatazione segue una legge parabolica del tipo:

$$x = k_{CO_2} \cdot \sqrt{t}$$

Dove x è lo spessore dello strato carbonatato, t rappresenta l'età della struttura al momento dell'effettuazione della prova di carbonatazione mentre k_{CO_2} è un coefficiente che dipende sia dalle caratteristiche del calcestruzzo che da fattori ambientali.

Pertanto, determinato il valore x con la soluzione alla fenolftaleina e nota l'età della struttura t sarà possibile determinare il valore di k_{CO_2} .

5.2.6.6 Fenolftaleina: agente cancerogeno

Nel 2013 l'ECHA (l'Agenzia Europea per le Sostanze Chimiche) ha inserito la fenolftaleina tra le 20 sostanze alla "Candidate List", che contiene l'elenco delle sostanze estremamente preoccupanti (SVHC-substance of very high concern), ossia le sostanze più pericolose che ci siano per la salute umana e per l'ambiente e che oramai hanno raggiunto

un numero pari a 73. Le sostanze SVHC sono quelle cancerogene, mutagene o tossiche per la riproduzione di categoria 1A o 1B o loro combinazione, o PBT (persistenti, bioaccumulanti e tossiche), o vPvB (molto persistenti e molto bioaccumulanti), o tossiche per altri motivi, ma di uguale gravità per l'uomo e per l'ambiente. Le sostanze presenti nella lista sono tutte usate o prodotte in situazioni dove c'è possibilità di contaminazione per i lavoratori e/o professionisti, o consumatori, o per l'ambiente. Le aziende produttrici o importatrici hanno l'obbligo legale, quando una sostanza è inserita nella "Candidate List" ed è presente sul mercato da sola o in un articolo o in miscela, di notificare entro sei mesi la sua presenza, se sono verificate le due condizioni seguenti:

- a) la sostanza è presente negli articoli in quantità che supera il totale di 1 t/a;
- b) la sostanza è presente in questi articoli in concentrazioni $>0,1\%$ in peso.

Successivamente la Commissione Europea potrà decidere se una sostanza che è presente nella Candidate List deve essere inserita nell'Authorization List (Annex XIV del regolamento Reach), collocazione questa che impone un'autorizzazione per essere usata e che molto probabilmente la può fare uscire dal mercato.

È importante, anche per il mondo accademico, conoscere le sostanze che sono presenti in questa lista, perché ci informano che molto probabilmente occorrerà trovare alternative da proporre all'industria e questo può dare spunti per la ricerca futura. La loro conoscenza è anche utile per chi le usa in laboratorio per tematiche scientifiche (per le quali non c'è adesso nessuna limitazione al loro uso) non solo per conoscere i rischi che si corrono nell'utilizzarle, ma anche per rendersi conto in anticipo, che sarà molto difficile portare i risultati della propria ricerca a livello industriale, impiegando quelle sostanze. Il pericolo di una sostanza chimica è dato dalle sue proprietà intrinseche, ma il rischio dipende anche dalle quantità utilizzate e dal tipo d'uso perché possono essere esposti a quella sostanza non solo lavoratori industriali che operano in ambienti ben controllabili, ma anche tecnici specializzati e consumatori durante l'uso dei prodotti e degli articoli e alla fine della loro vita.

La fenoltaleina, preparata per reazione fra fenolo ed anidride ftalica in presenza di acido solforico, è considerata come Cancerogeno categoria 1B con l'indicazione di pericolo H350, ma stabilisce un "Limite di concentrazione specifico" pari a: $C \geq 1\%$.

In passato ha avuto un largo impiego anche come lassativo, ma a causa degli effetti collaterali e dei recenti dati sperimentali, che sembra dimostrino la correlazione fra uso cronico ed effetto genotossico e cancerogeno, la fenoltaleina è stata eliminata da tutti i prodotti farmaceutici da banco.

La fenolftaleina trova unico impiego nei laboratori chimici dove viene usata comunemente come indicatore di pH nelle titolazioni acido-base in soluzione etanolica.

In commercio è reperibile come sostanza pura in polvere da impiegare per le successive preparazioni o come soluzione indicatrice pronta all'uso. Anche nel caso della soluzione etanolica pronta all'uso spesso le concentrazioni sono $> 1\%$ e quindi presenta ancora l'indicazione di pericolo H350. La sostanza viene dunque trattata con le dovute cautele in quanto è necessario che la stessa non venga respirata e non entri in contatto con le mani nude.

5.2.7 Rilievo colorimetrico degli ioni cloruro

5.2.7.1 Finalità della prova

La misura dello spessore di calcestruzzo penetrato dagli ioni cloruro consente di stabilire il livello di degrado del manufatto, individuando lo stato di avanzamento della corrosione del metallo (armatura).

5.2.7.2 Principio di funzionamento

Per stabilire lo spessore del calcestruzzo attaccato dagli ioni cloruro, viene impiegato un metodo colorimetrico di natura qualitativa, che utilizza una soluzione di nitrato d'argento. Laddove non è presente il cloruro il nitrato di argento si ossida e conferisce al calcestruzzo una colorazione bruna, ben distinguibile dalle zone di calcestruzzo non interessate dall'attacco dei cloruri.

5.2.7.3 Riferimenti normativi

L'esecuzione della prova si basa sulle prescrizioni della UNI 11747:2019 sulle prove calcestruzzo indurito. Nel dettaglio all'interno del testo dal titolo: "*Prove sul calcestruzzo indurito – Determinazione della profondità di penetrazione degli ioni cloruro*", vengono indicate le modalità per il rilievo della profondità di penetrazione degli ioni cloruro liberi in un provino di calcestruzzo.

5.2.7.4 Apparecchiatura

L'attrezzatura di prova per la determinazione del profilo di penetrazione dello ione cloruro nel calcestruzzo indurito è costituita da:

- Materiali (Reagenti)
 - Nitrato di Argento AgNO_3 soluzione titolata 0,1 mol/l (equivalente a 16,99 g/l)
 - Idrossido di Calcio in soluzione satura
- Attrezzature

- Bilancia con u incertezza di misura non maggiore di $\pm 0,5$ g
- Calibro con una incertezza di misura non maggiore di $\pm 0,5$ mm
- Termoigrometro ambientale
- Spruzzetta nebulizzatrice

5.2.7.5 Procedura di indagine

La prova effettuata su provini prelevati in situ prevede come fase preliminare l'operazione di frattura longitudinale (splitting) in direzione parallela a quella del processo diffusivo e lungo la linea di mezzeria del provino. La frattura dei provini deve essere eseguita secondo le modalità riportate nella UNI EN 12390-6.

Dopo la procedura di spacco le superfici di frattura devono essere immediatamente asciugate con materiale assorbente e quindi esposte all'ambiente di laboratorio per 30 ± 5 min.

Per provini prelevati in situ è opportuno procedere alla rialcalinizzazione delle superfici di frattura mediante spruzzatura di una soluzione alcalina, per esempio $NaOH$, prima del trattamento con $AgNO_3$. Il trattamento di rialcalinizzazione è necessario per riportare il pH del calcestruzzo, eventualmente soggetto a carbonatazione, a valori maggiori di 13

Appena trascorso questo tempo, le superfici devono essere trattate con la soluzione di Nitrato di Argento (0,1 N). Il trattamento deve avvenire attraverso un processo di proiezione (nebulizzazione) tale da assicurare la distribuzione del reagente in modo uniforme evitando accumuli locali e/o zone con insufficiente copertura. A tal fine si raccomanda di ripetere tale operazione dopo circa 30 min.

I provini devono essere conservati al buio per 7 giorni dal rilievo colorimetrico. Al termine di tale trattamento la zona contaminata da cloruri assume un colore grigio chiaro, mentre quella non ancora penetrata diventa più scura.

La conservazione al buio favorisce la identificazione della zona di transizione colorimetrica tra la zona penetrata e la zona non penetrata

In relazione al contenuto di ioni cloruro e alla composizione del calcestruzzo (in particolare in presenza di loppe o di aggiunte di tipo II, la colorazione può cambiare leggermente. In ogni caso la zona penetrata dagli ioni cloruro appare più chiara rispetto alla parte restante non ancora penetrata.

La profondità di penetrazione è rilevata lungo la linea di demarcazione ove il cambiamento di colore è visivamente percettibile. Le linee di misura lungo le quali deve essere effettuato il rilievo della profondità di penetrazione devono essere equidistanti tra

loro; la distanza tra due linee consecutive non deve essere maggiore di 10 mm. I due tratti corticali (dello spessore di circa 10 mm) dei provini devono essere esclusi dal rilievo.

5.2.8 Indagini ultrasoniche

5.2.8.1 Finalità della prova

Le prove ultrasoniche basano la loro capacità di stima della resistenza del calcestruzzo sulla velocità di propagazione delle onde ultrasoniche nel calcestruzzo stesso, essendo tale velocità strettamente correlata con il modulo elastico del calcestruzzo, a sua volta correlato con la resistenza a compressione.

La prova ultrasonica ha, perciò, come scopo principale la determinazione del tempo di propagazione di un impulso di vibrazione meccanica nel calcestruzzo fra una o più coppie di punti di rilievo. Misurando il tempo di attraversamento dell'impulso e lo spessore del mezzo posto tra le due sonde dell'apparecchio si calcola la velocità virtuale o apparente di propagazione degli impulsi e da essa, preliminarmente, si ricavano informazioni sull'omogeneità del calcestruzzo. In genere le misure ultrasoniche possono essere svolte per trasparenza, per semitrasparenza e per superficie, come mostrato in *Figura 39*.

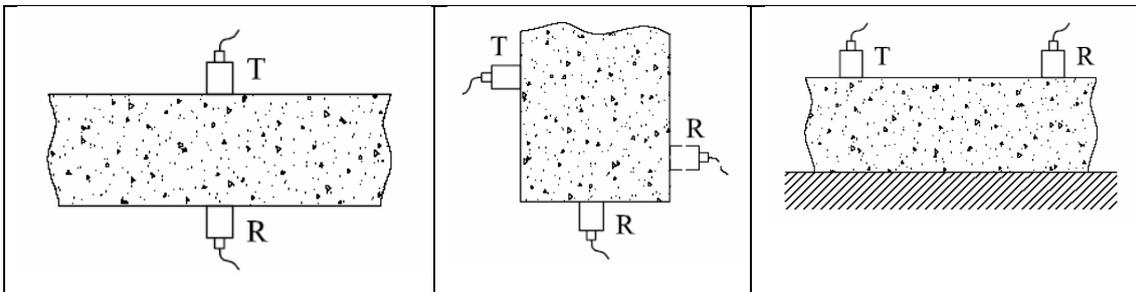


Figura 39 - Modalità di misure ultrasoniche

Trasparenza o Diretta: consiste nell'esaminare l'elemento strutturale in tutto il suo spessore; i trasduttori sono posti sulle due superfici opposte dell'oggetto indagato;

Semidiretta: i trasduttori si posizionano su due superfici adiacenti che formano tra loro un angolo α . Questa tecnica è poco utilizzata ed è destinata alla valutazione di parti terminali di elementi strutturali in c.a.

Indiretta: i trasduttori si posizionano sullo stesso piano d'appoggio. La trasmissione indiretta è utilizzata per ottenere delle informazioni sullo stato di conservazione degli strati più superficiali del manufatto.

5.2.8.2 Principio di funzionamento

Il principio sui cui si basa il metodo è il seguente: "un treno di onde longitudinali è prodotto mediante un trasduttore elettroacustico (sonda emittente in materiale

piezoelettrico o magnetostrittivo) posto a contatto con una superficie del calcestruzzo sottoposto a prova; dopo aver attraversato un percorso di lunghezza nota all'interno della matrice di calcestruzzo indurito, il treno di onde è convertito da un secondo trasduttore (sonda ricevente) in segnale elettrico elaborato da circuiti di temporizzazione elettronica che consentono di misurare il tempo di transito degli impulsi". Quando l'onda generata dalla sonda emittente in un punto dell'elemento sotto indagine viene captata da una sonda ricevente posizionata in un altro punto, questa viene trasmessa sotto forma di segnale elettrico ad un oscilloscopio che permette la determinazione del tempo intercorso tra la fase di emissione e quella di ricezione. Nota la distanza di percorrenza tra le due sonde è possibile quindi ricavare la velocità dell'onda elastica nel materiale in esame con la semplice relazione:

$$V = \frac{L}{T}$$

In cui:

L= spazio percorso dall'onda ultrasonica

T= tempo di transito

V= velocità dell'onda ultrasonica

5.2.8.3 Riferimenti normativi

La norma europea che disciplina la determinazione della velocità di propagazione degli impulsi delle onde longitudinali ultrasoniche in campioni o strutture di calcestruzzo fra una o più coppie di punti di rilievo è la UNI EN 12504-4 [UNI 2005]. La presente norma europea è basata sulla ISO/DIS 8047 "Concrete hardened – Determination of ultrasonic pulse velocity". Inoltre, tale metodologia di prova descritta al punto 12.5 delle "Linee guida per la messa in opera del calcestruzzo strutturale e per la valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo indurito mediante prove non distruttive", pubblicate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici - Servizio Tecnico Centrale.

5.2.8.4 Apparecchiatura

L'attrezzatura per la prova ad ultrasuoni è costituita da:

- un generatore/registratore di impulsi ultrasonici
- una sonda emittente (T) con frequenza pari a circa 50 kHz;
- una sonda ricevente (R) con frequenza pari a circa 50 kHz;
- una barra di calibrazione avente tempo di propagazione noto

5.2.8.5 Preparazione dell'area di indagine

Al fine di evitare l'influenza delle armature metalliche è opportuno, preliminarmente all'esecuzione della prova, localizzare le barre mediante indagine pacometrica, segnandone la posizione sulla superficie dell'elemento. Una volta individuate le aree di prova libere da armature e difetti superficiali quali distacchi di intonaco, delaminazioni etc., si procede alla rimozione dell'intonaco e ogni altro materiale presente (pittura, rivestimenti) presente sulla superficie. Al fine di favorire l'accoppiamento sonda-calcestruzzo è opportuno provvedere alla pulizia e alla lisciatura della superficie dell'area di prova.

In ogni caso prima dell'inizio delle misure ultrasoniche e al termine dell'esecuzione delle stesse deve essere verificata la bontà delle misurazioni stesse accoppiando le sonde sulla barra di calibrazione a tempo di transito noto.

5.2.8.6 Procedura di indagine

La frequenza del segnale trasmesso dai trasduttori dovrà essere compresa tra i 10 kHz ed i 200 kHz. Su ogni faccia delle superfici di calcestruzzo indagate la lettura va eseguita in aree interne alle zone di solo calcestruzzo, prive dell'eventuale intonaco soprastante, circoscritte dal reticolo delle armature individuate mediante le misure pacometriche. Analogamente a quanto detto per le prove sclerometriche, si dovrà evitare di eseguire misurazioni in corrispondenza di calcestruzzo distaccato o palesemente deteriorato.

È preferibile utilizzare frequenze comprese tra i 60kHz ed i 200kHz per piccoli percorsi del segnale (distanze inferiori ai 50 mm) e frequenze più basse comprese tra i 10kHz ed i 40 kHz per dimensioni particolarmente grandi con un massimo di 15 m. Frequenze comprese tra i 40 kHz ed i 60 kHz sono quelle utilizzate per le più comuni applicazioni.

5.2.9 Prova di estrazione Pull out

5.2.9.1 Finalità della prova

La prova di estrazione (pull-out) è un metodo non distruttivo per il controllo delle qualità meccaniche del calcestruzzo. Attraverso questa tecnica di indagine viene misurata la forza necessaria per estrarre un inserto metallico ad espansione da un elemento in calcestruzzo.

La prova può essere eseguita su un tassello pre-inglobato, ossia annegando il tassello nel getto al fine di controllare la qualità del cls in opera, oppure su un tassello

post-inserito nel caso di strutture già esistenti. che ha la particolarità di avere due diametri diversi: uno più piccolo (lo stelo), che permette di raggiungere la profondità di infissione prescritta dalla norma, ed uno più grande (testa o disco) che funge da ancoraggio.

La prova Pull out risulta essere un ottimo supporto e complemento alle prove per la determinazione della resistenza a compressione del calcestruzzo, come ad esempio il carotaggio nel caso di strutture esistenti e già in opera, o lo schiacciamento di provini cubici nel caso di strutture di nuova costruzione

5.2.9.2 Principio di funzionamento

Il principio su cui si basa la prova è il seguente: “un piccolo disco metallico (ossia la parte finale ad espansione di un opportuno tassello), dotato di uno stelo centrale su un lato, è inserito nel calcestruzzo in modo che lo stelo rimanga sporgente dalla superficie del calcestruzzo. Si misura la forza necessaria per estrarre il disco dal calcestruzzo.”.

A questo scopo si esercita una forza contro un anello di contrasto, concentrico rispetto all’inserito e poggiante sulla superficie del materiale stesso, per mezzo di un martinetto oleodinamico cavo dotato di manometro digitale munito di detentore di picco.

Il martinetto è azionato da una pompa idraulica collegata allo stesso da un tubo flessibile ad alta pressione. Il manometro misurerà attraverso il detentore di picco la forza massima necessaria che il martinetto ha esercitato per estrarre il tassello dall’elemento.

La prova, nonostante la bassa invasività, è stata fino ad oggi poco utilizzata a causa di problematiche inerenti la tipologia di inserti post-inseriti impiegati. Questi, infatti, non rispondenti a caratteristiche tecniche richieste dalla norma, compromettevano il risultato della prova causandone una scarsa attendibilità:

- un’espansione geometrica non controllata; la presenza di tensioni tangenziali sulla superficie laterale dello stelo del tassello;

- dei meccanismi di rottura differenti ed in alcuni casi anomali.

Oltre alla tipologia del tassello, influiva sull’esito della prova anche la non perpendicolarità del foro pratica, portando alla creazione di coni di rottura asimmetrici e quindi una distribuzione disuniforme delle tensioni.

Al fine di risolvere le problematiche esposte è stata proposta una procedura innovativa ³per l’esecuzione standardizzata della prova di estrazione Pull out. La procedura prevede l’utilizzo di un tassello perfettamente conforme ai requisiti geometrici

³ (Bufarini, D’Aria, & Gara, "Controllo della resistenza del cls in opera mediante procedura innovativa per l’esecuzione standardizzata della prova di estrazione pull-out con tasselli post inseriti", novembre 2019)

dimensionali prescritti dalla norma tale per cui la metodologia di prova non risulta affetta dalle dispersioni di risultati dovuti a utilizzo di inserti non idonei.

Grazie alla particolare forma dell'ancoraggio, oltre al tassello, viene anche estratta una porzione di calcestruzzo di forma tronco-conica. Le linee di frattura del tronco-cono vengono definite dalle dimensioni dell'inserto di acciaio, dalla profondità a cui viene inserito il diametro maggiore e dalle dimensioni dell'anello di contrasto.

5.2.9.3 Riferimenti normativi

La prova è normata dalla UNI EN 12504-3:2005 "Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Parte 3: Determinazione della forza di estrazione", richiamata nelle NTC 2018 al §11.2.6. "Controllo della resistenza del calcestruzzo in opera". La UNI EN 12504-3:2005 sostituisce la UNI 9536:1989+A1:1992 "Calcestruzzo indurito. Determinazione della forza di estrazione con inserti pre-inglobati nel getto"

5.2.9.4 Apparecchiatura

L'attrezzatura per l'esecuzione della prova Pull out comprende:

- Dispositivo a disco e stelo, post-inserito nel calcestruzzo indurito: il disco deve avere testa circolare $25 \pm 0,1$ mm di diametro. Lo stelo deve avere diametro non maggiore di 0,6 volte il diametro del disco. La lunghezza dello stelo, misurata dalla superficie del calcestruzzo fino alla superficie più vicina del disco, deve essere uguale al diametro del disco. I lati dello stelo devono esseri lisci e conici, con il diametro più largo nel punto più vicino alla superficie del calcestruzzo, per ridurre al minimo l'attrito durante la prova
- Anello portante_avente diametro interno di $(55 \pm 0,1)$ mm e diametro esterno di (70 ± 1) mm.
- Sistema di carico composto da martinetto oleodinamico cavo, pompa manuale e tubo idraulico flessibile ad alta pressione e manometro digitale con detentore di picco
- Trapano a percussione con manicotto guida per la realizzazione del foro
- Smerigliatrice dritta completa di fresa diamantata per l'alesaggio del foro

5.2.9.5 Preparazione dell'area di prova

Gli inserti metallici devono essere posizionati in modo che tutte le armature si trovino al di fuori della superficie di rottura conica prevista, ad una distanza pari almeno al diametro della barra di armatura o alla dimensione massima dell'aggregato quale che

sia il valore maggiore. A tal fine è fondamentale localizzare le barre d'armatura presenti mediante indagine pacometrica, segnandone la posizione sulla superficie dell'elemento.

5.2.9.6 Procedura di indagine

Nell'elemento in c.a. i centri delle posizioni di prova devono essere distanziati tra di loro di almeno 200 mm e distanti almeno a 100 mm dal bordo del calcestruzzo. Lo spessore minimo del calcestruzzo da sottoporre a prova deve essere 100 mm. Dopo aver definito i punti di estrazione si procede con l'esecuzione della perforazione degli stessi, utilizzando un manicotto guida che consenta una perforazione perpendicolare alla superficie di prova. Realizzato il foro si procede con l'alesaggio dello stesso al fine di realizzare un incavo di dimensioni $\varnothing 25$ mm per una profondità di 25 mm. Prima dell'inserimento del tassello è opportuno rimuovere i residui polverosi della perforazione e dell'alesaggio. Viene inserito quindi il tassello nel foro e subito dopo la capsula all'interno del tassello per poi procedere al collegamento del sistema idraulico.

Attraverso il martinetto, azionato da una pompa idraulica manuale o elettrica, si applica un gradiente di carico costante di circa 0,5 kN/s senza shock, fino al verificarsi della frattura e registrando quindi la forza massima rilevata per l'estrazione dell'inserto.

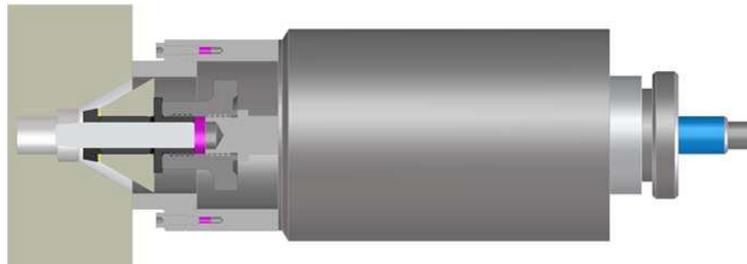


Figura 40 – Schema dell'esecuzione della prova

(Fonte: *Materials and Structures, Testing and Research*, 2019)

5.2.10 Indagini radar

5.2.10.1 Finalità della prova

Il metodo d'Indagine georadar o G.P.R. può essere utilizzato sia per effettuare analisi orizzontali (sottosuolo, pavimenti) che verticali (strutture murarie). L'obiettivo dell'analisi orizzontale è quello d'individuare strutture sepolte (come quelle archeologiche ad es.) e sottoservizi (condotte, cavi, sistemi di reti in genere). L'obiettivo dell'analisi verticale è quello di individuare le anomalie del manufatto (porte murate, interventi di restauro).

La metodologia consente di definire lo stato generale delle strutture in calcestruzzo (CLS), muratura e pietra.

5.2.10.2 Principio di funzionamento

Il metodo comunemente chiamato georadar (ground probing radar - GPR) è un sistema di indagine geofisica del sottosuolo, per modeste profondità, basato sulla riflessione delle onde elettromagnetiche.

Operativamente consiste nell'invio nel terreno di impulsi elettromagnetici ad alta frequenza (compresa tra 10 e 2000 Mhz.) e nella misura del tempo impiegato dal segnale a ritornare al ricevitore dopo essere stato riflesso da eventuali discontinuità intercettate durante il suo percorso; tali riflessioni sono generate in corrispondenza delle superfici di contatto tra i materiali a differente costante dielettrica o differente conducibilità elettrica, quindi dal cambiamento delle proprietà elettriche del sottosuolo, quali variazioni litostratigrafiche e del contenuto d'acqua. La profondità d'investigazione dipende dalla frequenza delle onde elettromagnetiche irradiate e dalle caratteristiche elettriche dei materiali.

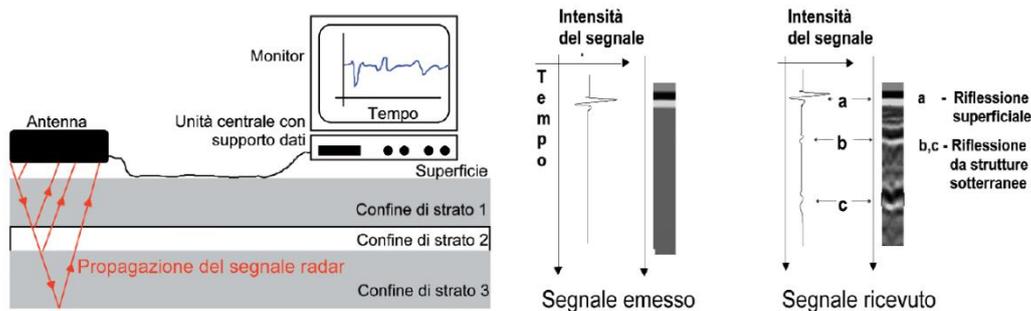


Figura 41 - Principio dell'indagine georadar (sinistra) e segnale emesso e ricevuto (destra)

(Fonte: *Il restauro dell'architettura moderna in cemento armato*, 2019)

Le frequenze impiegate determinano, a parità di condizioni, la massima profondità d'investigazione e la capacità di risoluzione. Per tale motivo si impiegano GPR con frequenze medio-basse (200-600 MHz) per la ricerca di cavità nel sottosuolo o per individuare strutture metalliche e non metalliche, quali cavi, tubazioni, e opere in cemento e muratura; la sua applicazione a strutture murarie in genere avviene utilizzando trasduttori con frequenze più elevate (>900 MHz) che permettono l'individuazione di variazioni centimetriche all'interno del manufatto in esame. I segnali elettrici così ottenuti (echi radar) sono registrati, elaborati e riprodotti su schermo (su carta) in modo da visualizzare una sezione dei segnali riflessi, definita sull'asse delle ordinate dai tempi di analisi dei segnali riflessi e sull'asse delle ascisse dalla posizione in superficie dell'antenna sorgente-ricevitore; ai segnali sono inoltre applicabili varie tecniche di elaborazione onde permettere la rappresentazione bi e tridimensionale di parametri fisici evidenziando particolari caratteristiche dei volumi investigati.

5.2.10.3 Riferimenti normativi

La panoramica generica sui principi base della tecnica, sull'acquisizione dei dati ed interpretazione dei risultati è contenuta all'interno delle norme ASTM D6432-99 [2005] "Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation".

5.2.10.4 Apparecchiatura

I componenti principali che costituiscono un radar sono:

- un'unità di controllo con registratore incorporato,
- un trasduttore composto da un'antenna trasmittente e da un'antenna ricevente,

5.2.10.5 Procedura di indagine

L'antenna viene fatta scorrere lungo una o più linee di indagine, secondo una griglia stabilita, in modo che i segnali possano successivamente essere associati alla posizione reale da cui sono stati emessi e ricevuti.

L'elaborazione dei dati campali con finalità di identificazione di manufatti e di strutture avviene con appositi software in due fasi ben distinte: trasformazione dei dati grezzi attraverso filtri e algoritmi di elaborazione in modo da produrre dati chiaramente leggibili, interpretazione dei dati per individuare i segnali (target) attribuibili a cavità, manufatti e strutture e per stimarne la loro profondità.

La profondità delle superfici di riflessione, individuabili sulle sezioni radar (radargrammi), è determinata utilizzando una relazione matematica che lega la profondità suddetta al tempo di riflessione, direttamente leggibile sulle sezioni radar, attraverso la velocità degli impulsi radar nel materiale investigato (V_m). I valori medi di velocità degli impulsi radar nei diversi tipi di materiale possono essere ricavati dalla letteratura tecnica ma è preferibile utilizzare gli appositi algoritmi di analisi di velocità di cui sono dotati tutti i software di elaborazione per dati GPR. A parità di materiale, la velocità del segnale radar può infatti variare anche significativamente in funzione di parametri quali la porosità e l'umidità.

Quando si esegue un'indagine radar i principali parametri da tenere in considerazione sono la massima profondità d'investigazione e il potere risolutivo; poiché la frequenza degli impulsi elettromagnetici influisce sia sul potere risolutivo sia sulla profondità di investigazione, le antenne ad alta frequenza sono generalmente impiegate per la ricerca di piccole anomalie poco profonde mentre quelle a bassa frequenza sono utilizzate per la prospezione di anomalie più profonde e più estese

5.2.11 Prove endoscopiche

5.2.11.1 Finalità della prova

L'endoscopia è una tecnica molto utile nella diagnostica, dà la possibilità di poter osservare direttamente forma ed aspetto di quanto indagato e consente di effettuare valutazioni di tipo qualitativo ed in alcuni casi quantitativo dei materiali indagati.

Questa tecnica ha il limite, nel caso di indagini su materiali, di essere ristretta alla zona circoscritta dalla superficie del foro d'indagine, per cui, ad esempio, in una muratura o in una tamponatura consente l'osservazione, sia pure per l'intero spessore, di una superficie minima (in genere fori di pochi mm di diametro), per contro se utilizzata per la prospezione di ampi spazi, come ad esempio l'intradosso di solai controsoffittati, è un ottimo strumento che consente rilievi precisi e ben documentabili.

5.2.11.2 Riferimenti normativi

Per quanto concerne l'indagine endoscopica non esiste una normativa che regolamenta l'esecuzione della prova.

5.2.11.3 Apparecchiatura

In ambito edilizio è usato l'endoscopio flessibile a fibre ottiche. Lo strumento è costituito da un fascio centrale di fibre ottiche coerenti, a cui coassialmente è montato un altro fascio di fibre ottiche. In questo modo il fascio centrale trasporta l'immagine da una estremità (obiettivo) all'altra (oculare). Le fibre che formano l'anello esterno sono invece utilizzate per illuminare la zona indagata.

Lo strumento è dotato di un monitor che consente all'operatore di conoscere in ogni momento la posizione nello spazio di quanto osservato e acquisire immagini e video dell'ispezione.

5.2.11.4 Procedura di indagine

L'operazione preliminare da eseguire è quella di rilevare, mediante misurazioni dirette o indirette, lo spessore dell'elemento da indagare per poter stabilire la profondità del fondo foro nel caso in cui non si possa praticare il foro passante.

L'indagine endoscopica viene eseguita praticando un foro del diametro di 25 mm sulla superficie dell'elemento da indagare all'interno del quale viene introdotta la sonda endoscopica. In questo modo si realizza un esame visivo prima con l'obbiettivo a visione diretta e si procede alla quotatura degli strati di materiali attraversati mediante l'ausilio di un metro flessibile introdotto nel foro. Successivamente si procede al cambio di obiettivo per la visione laterale (a 90°) e si osservano le cavità o le anomalie.

5.2.12 Prelievo di campioni cilindrici di calcestruzzo

5.2.12.1 Finalità della prova

Si ricorre all'estrazione di provini cilindrici di calcestruzzo al fine di stimare le caratteristiche elasto-meccaniche del calcestruzzo in opera per poter individuare la resistenza di calcolo da inserire nelle verifiche di sicurezza o per individuare il valore di resistenza residua a seguito di aggressioni di tipo chimico (attacco solfatico, reazioni alcali aggregati, etc.) o fisico (incendi, fatica, etc.). La geometria e il numero dei campioni da prelevare è funzione della finalità dell'indagine e delle caratteristiche da determinare.

Le carote estratte utilizzando una carotatrice sono esaminate accuratamente, preparate mediante spianatura o rettifica e sottoposte a prova di compressione utilizzando i procedimenti normalizzati.

5.2.12.2 Riferimenti normativi

La campagna sperimentale dovrà essere eseguita secondo le prescrizioni impartite dalla UNI EN 12504-1 "Prelievo ed esame di carote" e dalla UNI EN 12390-1 "Prova sul calcestruzzo indurito – Forma, dimensioni ed altri requisiti per provini e per casseforme" e seguendo le sotto riportate prescrizioni di prova.4.

5.2.12.3 Apparecchiatura

L'apparecchiatura utilizzata per il prelievo di campioni in c.a. comprende:

- Carotatrice, attrezzatura in grado di estrarre delle carote dal calcestruzzo indurito,
- Bilancia o apparecchiatura equivalente, in grado di determinare la massa della carota, al momento della prova, con accuratezza allo 0,1% della massa
- Calibri e/o regoli, in grado di misurare le dimensioni della carota e dell'armatura di acciaio, con accuratezza all'1%.

5.2.12.4 Procedura di indagine

Le zone in cui effettuare i carotaggi devono essere scelte in modo da non alterare la capacità portante dell'elemento strutturale. Pertanto:

- nei pilastri, occorre evitare di effettuare fori in posizione eccentrica
- nelle travi, sono preferibili le zone ai quarti della luce e all'altezza dell'asse neutro
- particolare attenzione va posta in prossimità dei nodi strutturali

il diametro delle carote deve essere almeno superiore a tre volte il diametro massimo degli aggregati cercando di prelevare, ove possibile, carote di diametro non inferiore a 100 mm.

Nel decidere la lunghezza delle carote da prelevare per le prove di resistenza, occorre considerare:

- a) il diametro della carota;
- b) il metodo di rettifica applicabile;
- c) se il confronto deve essere effettuato con resistenza cubica o resistenza cilindrica

In linea generale bisogna tener presente che:

- le carote non dovrebbero contenere ferri d'armatura, e vanno comunque scartati i provini contenenti barre d'armatura inclinate o parallele all'asse della carota;
- il rapporto lunghezza/diametro dei provini deve essere possibilmente uguale a 2, o comunque compreso fra 1 e 2;
- si deve impedire l'essiccazione e realizzare prove su provini con umidità originale;
- si deve tenere in conto la posizione del carotaggio rispetto all'elemento, effettuando il prelievo nei pilastri possibilmente a metà altezza.

Se non diversamente specificato, eseguire il carotaggio perpendicolarmente alla superficie in modo da non danneggiare le carote. Tenere la carotatrice rigidamente posizionata durante il carotaggio

Immediatamente dopo il carotaggio, marcare in modo chiaro e indelebile ciascuna carota. Subito dopo il prelievo i campioni devono essere esaminati annotando le irregolarità, stimando la dimensione massima dell'aggregato grosso e il rapporto in volume tra l'aggregato grosso e quello fine, l'eventuale presenza di ferri di armatura e il relativo orientamento e posizione del campione. Successivamente il provino deve essere conservato in un contenitore sigillato fino a quando non viene tagliato a misura o le estremità non vengono rettificate/cappate.

5.2.13 Prelievo di campioni di acciaio

5.2.13.1 Finalità della prova

Scopo della prova è il prelievo di provini di acciaio finalizzato al ricavo di campioni di barre d'armatura per permettere la caratterizzazione fisico meccanica e verificare l'eventuale stato di deperimento dell'acciaio

Come l'estrazione di provini cilindrici di cls, anche il prelievo di campioni di acciaio è una tecnica invasiva nei confronti della struttura e pertanto non deve essere

eseguita in begli elementi strutturali oggetto dei carotaggi per non pregiudicarne la resistenza residua.

5.2.13.2 Riferimenti normativi

Il prelievo di campioni di acciaio è condotto secondo le prescrizioni impartite dalla UNI EN ISO 377: “Acciaio e Prodotti di acciaio – Prelievo e preparazione”

5.2.13.3 Apparecchiatura

L’attrezzatura utilizzata per il prelievo di campioni di acciaio è costituita da:

- Pacometro, per la ricerca di barre d’armatura
- Demolitore leggero per calcestruzzo
- Smerigliatrice
- Saldatrice ad elettrodi

5.2.13.4 Procedura di indagine

Nell’individuazione dell’area di estrazione del campione di acciaio è indispensabile effettuare un’indagine magnetometrica con la quale individuare e segnare la posizione delle barre d’armature.

Il prelievo va eseguito nelle zone poco sollecitate in modo da arrecare il minor disturbo possibile all’elemento strutturale.

Individuata l’area di prelievo si procede con la rimozione del copriferro ponendo attenzione a non intaccare la superficie del tondino in maniera da non compromettere il risultato del successivo test di laboratorio a cui sarà sottoposto. Il campione da prelevare deve avere una lunghezza necessaria per l’esecuzione della prova di trazione non superiore a 600 mm.

Prima di procedere al taglio e all’asportazione della porzione di barra si esegue la sovrapposizione dello spezzone aggiuntivo mediante saldatura in modo tale da garantire la continuità della barra. La lunghezza della sovrapposizione è funzione del diametro della barra prelevata. Entrambi gli spezzoni devono essere di acciaio qualificato e saldabile. Nel caso di acciai non saldabili un’alternativa può essere l’impiego di manicotti di adeguate caratteristiche meccaniche, certificati ed autofilettanti.

5.3 TERZA FASE: PROVE DI LABORATORIO

Le carote di cls e gli spezzoni metallici estratti dagli elementi strutturali secondo la procedura indicata ai paragrafi 6.2.12 e 6.2.13 devono essere inviati presso un laboratorio ufficiale o uno autorizzato per le rispettive prove di compressione e di trazione.

Le prove di laboratorio hanno lo scopo di fornire indicazioni sulle caratteristiche fisiche, chimiche e meccaniche dei materiali. Esse consentono inoltre di correlare i risultati delle indagini non distruttive direttamente con le resistenze del materiale in opera.

5.3.1 Determinazione della resistenza a compressione su campioni di cls cilindrici

La determinazione della resistenza a compressione su campioni cilindrici in calcestruzzo rientra tra i metodi cosiddetti diretti per i quali non è necessaria alcuna correlazione. La resistenza a compressione del cls è determinata su provini di forma cubica o cilindrica confezionati e stagionati in un ambiente a 20° e con umidità relativa > 95%. La dimensione del provino deve essere sufficientemente elevata da assicurare che un singolo aggregato non sia in grado di influenzare eccessivamente il risultato. In Europa si può effettuare la prova su cubi di cls in genere di lato 15 cm, cubo standard o cilindrica (diametro di 15 cm e altezza di 30 cm, $h=2$ volte il diametro).

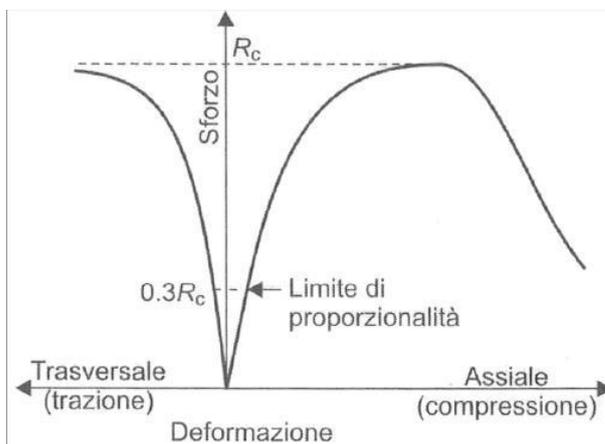


Figura 42 - Curva sforzo-deformazione

La figura mostra una tipica curva sforzo-deformazione del cls durante una prova di compressione monoassiale; a sinistra è riportata anche la deformazione trasversale (in direzione ortogonale a quella di applicazione del carico il provino si espande). Il comportamento è controllato dalle microfessure che sono presenti nell'interfaccia pasta-

aggregato già prima di sollecitare il materiale. La curva sforzo-deformazione è lineare fino a circa il 30% del carico massimo perché le microfessure restano stabili e non si propagano. In seguito, la curva si scosta dalla linearità prima gradualmente e poi in modo sempre più accentuato approssimandosi al carico massimo. Le microfessure crescono in numero e dimensioni e cominciano a interessare anche la matrice cementizia e non più solo la zona di interfaccia. Per sforzi compresi tra il 70 e il 90% del carico massimo le fessure diventano instabili (si propagano anche se la sollecitazione resta costante) e attraversano la matrice di malta che ingloba aggregati grossi. Ha così luogo un rapido collegamento delle fessure presenti che porta al cedimento del materiale. In corrispondenza a questi sforzi la deformazione trasversale aumenta notevolmente rispetto a quella longitudinale in seguito alla formazione di fessure verticali instabili. Oltre il carico massimo la curva può presentare un tratto decrescente in quando il cls fessurato è

ancora in grado di sopportare degli sforzi fino al momento in cui il collegamento delle microcricche dà luogo alla rottura del provino.

La resistenza a compressione indicata con R_c se viene determinata su un provino cubico e con f_c se si tratta di un provino cilindrico è definita come:

$$R_c; f_c = \frac{\text{carico massimo}}{\text{sezione resistente del provino}} = PA$$

5.3.1.1 Riferimenti normativi

La prova viene eseguita in conformità ai requisiti della EN 12350-1, della EN 12390-1, della EN 12390-2 e della EN 12504-1.

5.3.1.2 Apparecchiatura

La prova a compressione di provini in cls viene eseguita mediante la macchina per prova di compressione conforme alla EN 12390-4. Nella maggior parte dei casi si tratta di una macchina di tipo universale in grado di eseguire, oltre la prova di trazione, anche prove di compressione, flessione, taglio etc..

5.3.1.3 Requisiti dei provini

Nel caso di carote estratte in situ, il provino da sottoporre a prova di compressione il provino è di forma cilindrica. Nel caso in cui le dimensioni del provino si discostino dalle tolleranze per la dimensione nominale previste dalla EN 12390-1, essi devono essere scartati, rettificati o sottoposti a prova seguendo le prescrizioni dell'appendice B della norma.

Qualora ci sia la necessità di ridurre le dimensioni di un provino, deve essere eseguita la sua rettifica utilizzando uno dei metodi di molatura o cappatura indicati nell'appendice A.

5.3.1.4 Procedura

La prova di schiacciamento consiste nel posizionare il provino tra i piatti di acciaio di una pressa, posizionandolo e centrandolo in modo che il carico sia applicato perpendicolarmente alla faccia del provino. Il carico viene applicato in modo che l'incremento della tensione di compressione sia compreso tra $0.2 \div 1.0 \text{ N}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$. Il carico viene applicato senza provocare colpi e ammentandolo in modo continuo, alla velocità costante selezionata $\pm 10\%$, fino a quando il provino non riesce a sopportare un ulteriore carico e giunge a rottura.

Si registra quindi il carico massimo sopportato dal provino e si calcola la resistenza alla compressione del calcestruzzo.

Esempi di rottura del provino che dimostrano che le prove sono state eseguite in modo soddisfacente sono riportati nella *Figura 42* per i provini cilindrici, mentre gli esempi di rottura non soddisfacente dei provini sono riportati in *Figura 43*. Se la rottura non è soddisfacente, ciò deve essere registrato, facendo riferimento alla forma di rottura della *Figura 43*, che più si avvicina al tipo di rottura osservato.

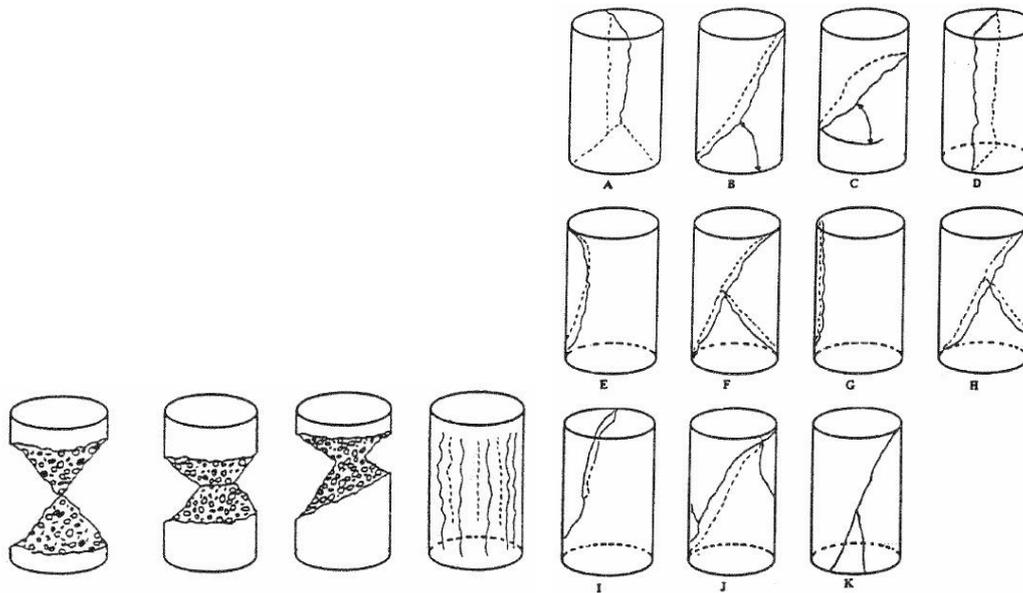


Figura 43 - - Forme di rottura idonee (a sx) e non idonee (a dx) delle carote cilindriche

5.3.2 Determinazione della resistenza a trazione sugli spezzoni metallici

È la prova meccanica più importante in quanto permette di misurare le fondamentali proprietà meccaniche con le quali si classificano, si designano e si scelgono i materiali metallici. In particolare, mediante questa prova, sono ricavati il carico unitario di snervamento, il carico unitario di rottura, l'allungamento percentuale a rottura.

5.3.2.1 Riferimenti normativi

La prova viene condotta seguendo la stessa metodologia di prova impiegata per i campioni di armatura metallica prelevati per la qualificazione del materiale durante il processo edilizio relativo a nuove costruzioni secondo le prescrizioni contenute sulla norma UNI EN 6892-1. La prova prevede la sollecitazione di un provino mediante forza di trazione, generalmente a frattura, per la determinazione delle proprietà meccaniche, tra le più comuni:

- *Resistenza allo snervamento*: lo stress al quale un materiale si deforma in modo permanente.
- *Allungamento del punto di snervamento*: la differenza tra l'allungamento del campione all'inizio e alla fine dello snervamento discontinuo (l'area in cui si verifica un aumento della deformazione senza un aumento dello stress).

- *Resistenza alla trazione*: la forza o lo stress massimo che un materiale è in grado di sostenere durante un test di trazione.
- *Riduzione dell'area*: una misura della duttilità di un materiale. È la differenza tra l'area della sezione trasversale originale di un campione e l'area della sua sezione trasversale più piccola dopo il test, di solito espressa come diminuzione percentuale della sezione trasversale originale. La sezione trasversale più piccola può essere misurata al momento della frattura o dopo di essa.

5.3.2.2 *Apparecchiatura*

La macchina per la prova di trazione è costituita da un'incastellatura, dal dispositivo per l'applicazione del carico, dagli organi per il fissaggio del provino o dell'elemento e dagli strumenti per la misura della forza. Il sistema di misurazione della forza della macchina di prova deve essere tarato in accordo con la UNI EN ISO 7500-1 e deve essere almeno di classe 1.

5.3.2.3 *Requisiti dei provini*

La lunghezza di uno spezzone metallico prelevato deve essere tale per cui la lunghezza libera tra i dispositivi di serraggio deve essere sufficiente perché i riferimenti si trovino ad opportuna distanza da questi dispositivi. Le tolleranze dimensionali delle provette devono essere conformi a quelle indicate negli allegati da B ad E della norma di riferimento.

5.3.2.4 *Procedura*

- Determinazione dell'area della sezione iniziale S_0

Il rilievo delle dimensioni della provetta deve essere effettuato in una adeguata sezione perpendicolare all'asse longitudinale in una zona centrale della lunghezza. Si raccomanda un minimo di tre sezioni perpendicolari. L'area della sezione iniziale (S_0) è la media delle aree, calcolate sulla base delle rispettive dimensioni misurate. L'accuratezza del calcolo dipende dalla natura e dal tipo di provetta. Gli allegati da B ad E descrivono i metodi di valutazione di S_0 per i diversi tipi di provetta e contengono specifiche per la precisione delle misurazioni

- Marcatura della lunghezza iniziale tra i riferimenti L_0

Ciascuna estremità della lunghezza iniziale tra i riferimenti deve essere marcata mediante segni sottili o piccole incisioni ma senza creare intagli in grado di provocare

rotture premature. Nel caso di provette proporzionali, il valore calcolato della lunghezza iniziale tra i riferimenti può essere arrotondato al multiplo di 5 mm più vicino.

- Impostazione del punto zero di forza e serraggio

Il sistema di misurazione della forza deve essere impostato a zero dopo avere installato i dispositivi di serraggio e prima che la provetta sia serrata.

Le provette devono essere tenute in posizione da mezzi idonei quali cunei, ganasce filettate di serraggio, ganasce a facce parallele, supporti di spallamento, ecc.. Occorre adottare tutte le misure possibili per assicurarsi che le provette siano mantenute in posizione in modo tale che il carico sia applicato il più possibile in modo assiale al fine di ridurre al minimo la flessione.

- Velocità di prova

In campo elastico e fino al raggiungimento del carico unitario di snervamento superiore la velocità di allontanamento delle teste opposte della macchina deve essere la più costante possibile e compresa entro i limiti corrispondenti alle velocità di incremento del carico unitario della *Tabella 12* della norma.

Modulo di elasticità del materiale (E) MPa	Velocità del carico unitario MPa/s	
	min.	max.
< 150000	2	20
≥ 150000	6	60

Tabella 12 - Velocità di incremento del carico unitario

La fase elastica si esaurisce con il raggiungimento del carico di snervamento, evidenziato sul diagramma di prova eseguito in tempo reale dal software. Finita la fase di snervamento e con l'inizio della fase plastica la velocità di prova può essere aumentata portando il campione fino a rottura. Se è richiesta soltanto la misurazione della resistenza a trazione del materiale, la velocità di prova non deve essere maggiore di $0,008 \text{ s}^{-1}$ per tutta la durata della prova.

Al termine della prova vengono registrati i valori dei carichi di snervamento e di rottura forniti dalla macchine.

Ai fini della determinazione dell'allungamento percentuale a rottura non proporzionale A_g , si misura sul semi-spezzone di lunghezza maggior, la lunghezza $L'u$ del tratto di misura di riferimento precedentemente tacchettato.

5.4 QUARTA FASE: DIAGNOSI

In questa fase il processo diagnostico prosegue con l'analisi e lo studio di tutta la documentazione raccolta in situ durante il sopralluogo, dei dati storici, dei risultati delle prove in situ e dei test di laboratorio.

5.4.1 Interpretazione dei risultati

5.4.2 Individuazione cause

Alla diagnosi preliminare dei dissesti effettuata nella prima fase che è stata indicata come pre-diagnosi, segue la fase diagnostica vera e propria. È in questa fase che le cause che hanno prodotto il dissesto e il degrado devono essere individuate. Si possono identificare due casi:

- I dissesti sono immediatamente identificabili: sono quei dissesti che già in fase di sopralluogo e di pre-diagnosi risultano chiari all'occhio dell'esperto.
- I dissesti non sono immediatamente identificabili: sono quei dissesti che risultano complessi da identificare e da decifrare. Ai fini della loro comprensione svolgono un ruolo importante il rilievo ed il tracciamento del quadro fessurativo.

A questo punto si passa alla formulazione di una prima ipotesi di dissesto e di cause perturbatrici. Se l'ipotesi effettuata è confermata dall'esame dei dati precedentemente raccolti allora l'ipotesi di dissesto e di cause perturbatrici risulta accettabile e quindi accettata. Se così non fosse, occorrerebbe formulare una nuova ipotesi di dissesto e si procederà così per successive iterazioni fin quando non si raggiungeranno risultati soddisfacenti.

5.5 QUINTA FASE: INTERVENTI DI RECUPERO E RINFORZO

La progettazione di un intervento di conservazione o di riparazione di una struttura in calcestruzzo armato non può prescindere dalla disamina delle cause responsabili delle patologie (forme di alterazione, degrado e dissesto) di cui l'opera è affetta. Unitamente a quest'aspetto fondamentale, al fine di meglio comprendere e valutare i problemi connessi con l'intervento di manutenzione straordinaria è, altresì, necessario comprenderne gli aspetti storico-culturali, oltre ad individuarne l'apparecchiatura costruttiva dal punto di vista sia statico che architettonico. Infine, prima di procedere alla definizione dell'intervento di ripristino occorrerà tener conto anche delle aspettative della committenza e il contesto in cui l'opera è inserita.

Il progettista dopo aver compreso gli aspetti storico-critici della costruzione, oltre ad aver preso atto dei fenomeni di degrado in corso e aver indagato le caratteristiche dei materiali utilizzati, potrà procedere alla progettazione dell'intervento di ripristino indicando le strategie di intervento procedendo, successivamente, alla scelta dei materiali e dei sistemi da impiegare per la loro attuazione, alla definizione delle modalità di realizzazione dell'intervento prescelto.

5.5.1 Interventi di ripristino e recupero della sezione in c.a.

Come menzionato ai precedenti paragrafi, gli obiettivi che si possono perseguire con un intervento di ripristino sono molteplici in relazione alle cause che hanno determinato i fenomeni di alterazione, degrado e dissesto dell'opera oggetto di indagine.

Obiettivi generali dell'intervento di manutenzione e ripristino di strutture in calcestruzzo armato:

- ripristinare la sicurezza strutturale dell'opera: le azioni aggressive ambientali, quelle legate all'uso quelle eccezionali ma anche difetto congeniti, sia di tipo progettuale che esecutivo infatti, possono aver condotto al superamento di uno stato limite e quindi alla perdita dei livelli di sicurezza minimi previsti per la struttura da richiedere un intervento di restauro finalizzato al miglioramento della statica e/o all'adeguamento sismico di un elemento in calcestruzzo armato e/o della struttura nel suo complesso.
- ripristinare la funzionalità della struttura: un'opera pur non presentando problemi di sicurezza strutturale può denotare segni di alterazione e degrado che ne compromettono l'utilizzo.
- migliorare o ripristinare l'estetica: la maggior parte degli interventi conservativi mirano a ripristinare l'estetica di una struttura compromessa ad esempio dal deposito di particolato atmosferico, da colonizzazioni biologiche, da efflorescenze saline o più frequentemente da espulsioni di porzioni di calcestruzzo come conseguenza della corrosione delle armature indotta dall'azione dell'anidride carbonica dell'aria o dai cloruri presenti nell'acqua di mare.

Di seguito vengono analizzate le tecniche di intervento maggiormente utilizzate sulle opere in calcestruzzo ammalorate.

- ricostruzione della sezione originaria dell'elemento degradato;
- protezione e/o la decorazione della superficie delle opere in calcestruzzo armato;
- la sigillatura di strutture in calcestruzzo fessurate;
- adeguamento strutturale e antisismico di elementi in c.a. mediante piatti di acciaio, lamine in materiale composito, tessuti in acciaio o in materiale composito;

- pulitura delle superfici;
- protezione mediante inibitori di corrosione;
- protezione catodica;
- rialcalinizzazione elettrochimica.

5.5.1.1 Ricostruzione della sezione originaria dell'elemento degradato

Gli interventi di ricostruzione di un elemento in calcestruzzo armato possono essere classificati in tre grandi tipologie:

1. Interventi corticali: interessano lo spessore più esterno dell'elemento, generalmente pari al copriferro. Sono catalogati come interventi non strutturali poiché la porzione di cls ricostruita non partecipa all'impegno statico dell'elemento ma funge piuttosto da copertura e protezione per le barre di armatura.
2. Interventi di ricostruzione parziale o totale: coinvolgono uno spessore maggiore rispetto a quello del copriferro e interessano in modo parziale anche il nucleo in calcestruzzo dell'elemento. Interventi di questa tipologia sono frequenti nelle strutture in cui non viene effettuata una manutenzione programmata e gli elementi in c.a. sono esposti ad ambienti aggressivi tali da produrre il degrado di porzioni consistenti della sezione in c.a. In questo caso la porzione ricostruita contribuirà unitamente a quella originaria non soggetta a degrado alla statica dell'elemento strutturale e pertanto è considerato un intervento di tipo strutturale.
3. Interventi di incremento della sezione originaria: si rendono necessari qualora occorra incrementare la capacità portante di un elemento in c.a. oppure modificarne la rigidità, nel caso ad esempio di un cambio di destinazione d'uso o di adeguamento antisismico. Per tale motivo sono inquadrati come interventi di adeguamento strutturale.

È un dato di fatto che gli interventi locali di ripristino del copriferro siano quelli più ricorrenti e che interessano la maggior parte delle strutture sottoposte a manutenzione. Ciò è confermato dal fatto che gli edifici oggetto di questi interventi appartengono al periodo costruttivo degli anni '60-'70, caratterizzati da materiali scadenti e bassi spessori di copriferri.

Le carenze dovute alla scarsa qualità dei materiali, esaltate dagli errori esecutivi delle opere e da errori di progettazione dei particolari costruttivi ha determinato negli edifici esistenti un'accelerazione dei processi di degrado e corrosione delle barre con

conseguenti espulsione del copriferro (generalmente 30-35 mm). La ricostruzione di questi spessori modesti di materiale viene effettuata con malte tixotropiche o colabili/autocompattanti, caratterizzate da aggregati a grana fine. Le malte tixotropiche, sono chiamate così in virtù della tixotropia, ovvero la capacità del materiale di comportarsi come un “gel”. Sotto l’azione meccanica, le malte tixotropiche fluidificano più velocemente e una volta terminata la sollecitazione, ritornano allo stato originario. La malta tixotropica, a differenza della colabile o autocompattante, non richiede l’impiego di cassetture poiché durante l’applicazione rimane ferma sul punto in cui è stata posata e pertanto risulta adatta per interventi su strutture verticali o orizzontali in corrispondenza degli intradossi. Le malte colabili/autocompattanti vengono impiegate nel caso di interventi in corrispondenza di estradossi di strutture orizzontali o in generale quando si hanno spessori di ripristino maggiori di 60-70 mm.

Negli interventi di ricostruzione parziale gli spessori interessati dal ripristino sono maggiori rispetto a quello del copriferro. Nel caso di spessori superiori a 60-70 mm si rende necessario l’impiego di malte colabili o autocompattanti caratterizzate da aggregati di pezzatura massima compresa tra 8 e 12 mm, in modo da ridurre il ritiro idraulico del conglomerato. Nel caso di spessori di intervento oltre i 100 mm si dovrà ricorrere all’impiego di calcestruzzi superfluidi o autocompattanti.

È opportuno precisare che per spessori di ripristino maggiori di 60-70 mm di cls, casistica riscontrata nel caso di interventi che prevedono il ringrosso della sezione originaria, va operato il getto entro cassero di malte colabili anche per strutture verticali e per quelle orizzontali all’intradosso, poiché si intende che lo spessore da ripristinare interessi tutto l’elemento strutturale e comunque grandi superfici. L’impiego di malte colabili andrà previsto anche nel caso di spessore medio da ripristinare inferiore a 60-70 mm e solo in qualche porzione è necessario un ripristino di spessore maggiore.

Poiché questo tipo di ripristino generalmente si presenta esteticamente non omogeneo per la differenza cromatica tra il calcestruzzo originario e il materiale di ripristino, viene completato con l’applicazione su tutta la superficie dell’elemento di una malta per rasatura applicata a mano in spessore variabile da 1 a 3 mm e poi rifinita a fratazzo per conseguire la tessitura desiderata.

5.5.2 Sigillatura delle lesioni

La sigillatura di lesioni viene eseguita allo scopo di ripristinare la monoliticità della sezione di una struttura, fondamentale quando ci si trova di fronte a fessure generali dal

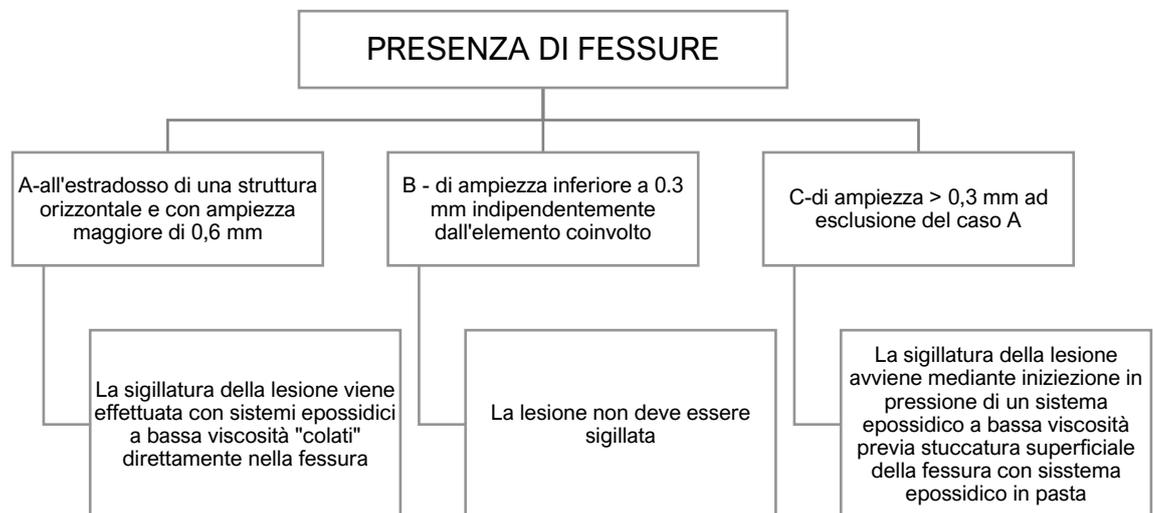
superamento della resistenza a trazione del calcestruzzo per carenza di geometria o deficit di armatura.

La sigillatura avviene in due fasi distinte: prima bisogna procedere alla stuccatura della lesione e successivamente alla sua iniezione.

I materiali usati per le iniezioni non contengono matrici cementizie poiché devono conferire alla sezione lesionata una resistenza a trazione maggiore rispetto a quella del materiale cementizio.

Prima di procedere alla sigillatura della lesione è fondamentale comprenderne la genesi in quanto non tutte le lesioni devono essere iniettate. Ad esempio, in presenza di lesioni generate dall'impedimento di contrazione da ritiro, queste devono essere considerate come dei "giunti naturali" che non possono essere iniettate e richiuse con materiali rigidi dotato di scarso allungamento perché ciò comporterebbe nuovamente la formazione di nuovi "giunti". I materiali adatti che garantiscono una corretta trasmissione degli sforzi tra due cigli fessurativi sono costituiti da sistemi epossidici bicomponenti a consistenza di pasta, usati per la preliminare sigillatura, e sistemi epossidici bicomponenti a bassa viscosità da iniettare in fessura.

Effettuata la diagnosi della lesione e stabilito la necessità di doverla sigillare, occorre adottare strategie diverse a seconda delle ampiezze fessurative rilevate.



5.5.3 Rinforzo statico delle strutture in c.a.

L'impiego dei materiali compositi rappresenta una realtà, ormai consolidata, nel panorama delle tecniche di rinforzo per adeguamenti statici e sismici di strutture esistenti in c.a. Con il termine "*materiali compositi*" si identifica *un sistema di due o più componenti che, pur conservando la propria identità chimica ed elasto-meccanica,*

contribuiscono mutuamente a garantire l'ottenimento di un materiale di prestazioni superiori a quelle conseguibili utilizzando i singoli componenti separatamente⁴.

I materiali compositi per il rinforzo delle strutture in c.a. vengono suddivisi in:

-sistemi preformati prevalentemente in forma di lamine o di barre indicati per il rinforzo di membrature con profili uniformi e rettilinei, privi di convessità o concavità, e per substrati in calcestruzzi che non presentino forme di alterazione della superficie;

-sistemi impregnati in situ costituiti da tessuti uni o multidirezionali in carbonio, vetro e aramide impregnati in cantiere con sistemi epossidici che fungono sia da matrici polimeriche che da adesivo al substrato.

Tra i sistemi impregnati in situ rientrano anche i tessuti unidirezionali in fibre di acciaio lunghe che vengono applicati ricorrendo sia all'utilizzo di matrici epossidiche – FRP (Fiber Reinforced Polymer) che di malte a base cementizia – FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix) e le reti (in vetro, aramide, basalto, acciaio o combinazione di questi materiali) impregnati in situ in matrici inorganica a base cementizia FRCM.



a. Lamina pultrusa



b. Tessuto in fibra di carbonio



a. Impregnazione in situ con una matrice epossidica di un tessuto in fibre di acciaio



b. Tessuto in fibra di acciaio impregnato in situ in uno strato di malta di cemento

Figura 44 - Sistemi preformati ed impregnati in situ

Figura 45 - Impregnazione in situ dei sistemi

Questi sistemi sono tra i materiali compositi quelli più diffusi grazie alla loro versatilità d'impiego e alla possibilità di poterli installare su membrature in calcestruzzo con forme e geometrie complicate.

I principali campi di applicazione dei materiali compositi nel settore del ripristino delle costruzioni esistenti attengono al:

-**Rinforzo a flessione** di elementi strutturali quali travi, solai a travetti e pignatte e a soletta piena laddove il momento flettente derivante dai carichi agenti risulta maggiore del momento resistente della sezione.

⁴ (Buoso & Coppola, 2019)

-Rinforzo a taglio di travi da realizzarsi laddove la resistenza a taglio dell'elemento strutturale, desunta sia dal contributo del calcestruzzo che dell'armatura tradizionale, è inferiore alla sollecitazione derivante dai carichi agenti.

Le strisce di tessuto possono essere applicate, qualora si ricorra a tessuti unidirezionali, sia in adiacenza che in maniera discontinua. La disposizione dei tessuti può avvenire ricorrendo alle configurazioni ad una conformazione a U e, ove possibile, in totale avvolgimento della sezione della trave.

-Rinforzo a torsione di elementi strutturali, con resistenza a questa sollecitazione inferiore rispetto a quella agente, mediante incollaggio, generalmente di tessuti applicati sulla superficie esterna della trave le cui fibre siano disposte con un angolo di inclinazione rispetto all'asse della trave di 90° e in avvolgimento totale;

-Confinamento di elementi verticali in c.a. soggetti a sforzo normale centrato o con piccola eccentricità laddove risulta necessario aumentare la resistenza e la corrispondente deformazione ultima oppure ove si necessita negli elementi pressoinflessi di un incremento della duttilità e (congiuntamente all'utilizzo di rinforzi disposti nella direzione dell'asse principale dell'elemento) della resistenza ultima.

-Reintegro dell'armatura in elementi strutturali che presentano ferri fortemente corrosi con rilevante riduzione della sezione del tondino e perdita di materiale metallico.

-Miglioramento del comportamento antisismico: il ricorso all'impiego dei materiali compositi consente di migliorare la risposta nei confronti dell'azione sismica attraverso:

- a) l'eliminazione dei meccanismi di collasso fragile;
- b) l'eliminazione dei meccanismi di collasso di piano (soft floor);
- c) il miglioramento della capacità deformativa globale della struttura;
- d) l'eliminazione del ribaltamento dei pannelli di tamponamento al di fuori del piano.

Capitolo 6

IL CASO DI STUDIO

6.1 INQUADRAMENTO DELL'EDIFICIO

L'edificio in c.a. oggetto del presente studio è ubicato nella zona litoranea di Ostia, quartiere del Comune di Roma (RM). Si tratta di un edificio ad uso residenziale e di tipo a torre.

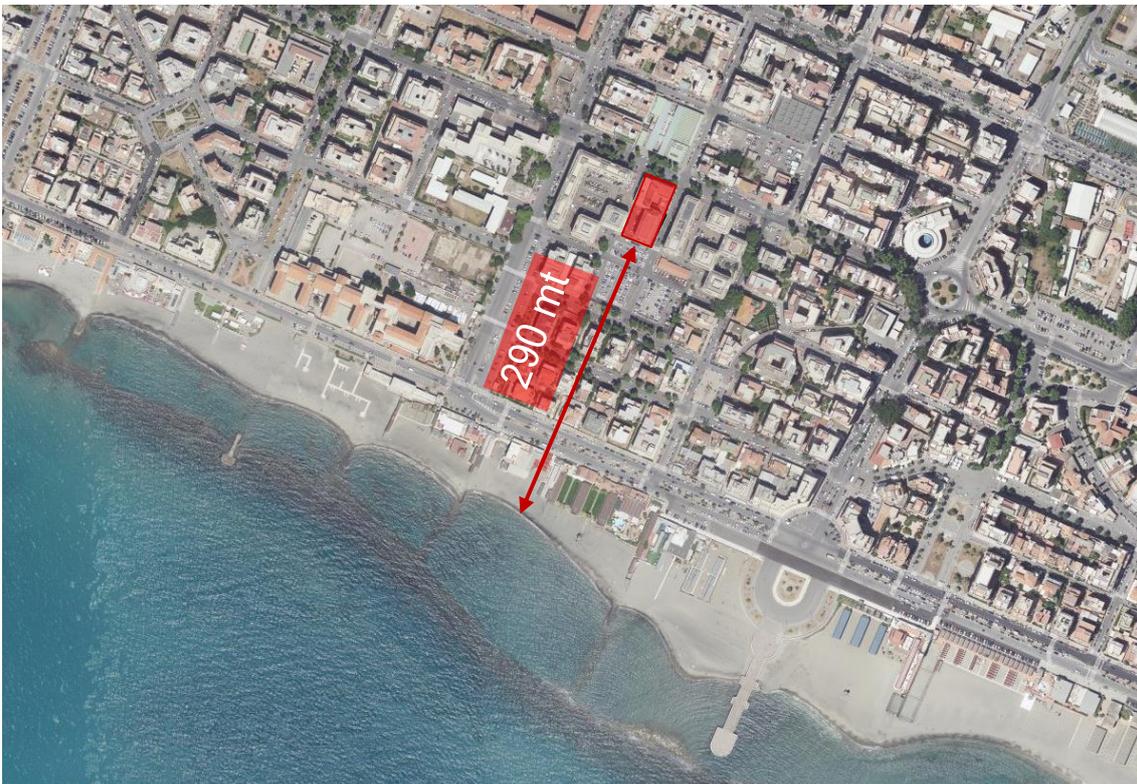


Figura 46 - Inquadramento fotografico dell'edificio da Google Maps

Il contesto urbano in cui si inserisce l'attuale fabbricato nasceva come zona di edilizia intensiva e destinata quindi alla realizzazione di fabbricati consistenti per densità e dimensioni, per lo più a uso abitativo, avente il fine di uno sfruttamento intensivo del suolo.

L'edificio segue l'andamento del lotto di forma rettangolare ed è costituito da due corpi di fabbrica denominati A e B, collegati tra loro e in cui si inseriscono i volumi degli edifici attigui.

Il corpo di fabbrica A si sviluppa su 5 piani fuori terra, di cui l'ultimo piano dà accesso al livello dell'attico mediante scale interne agli appartamenti posizionati al quarto piano. Le dimensioni esterne sono pari a: lato minore 15,30 mt e lato maggiore 32,30 mt per tutti i piani.

Il corpo di fabbrica B si sviluppa invece su 4 piani fuori terra che culminano con un lastricato solare. Le dimensioni esterne del piano terra sono pari a: lato minore 6,20 mt e lato maggiore 20,50 mt, per i restanti piani le dimensioni sono pari a: lato minore 9,10 mt e lato maggiore 27,20 mt circa.



Figura 47 - Inquadramento planivolumetrico da Google Maps

6.2 ANALISI STORICO-CRITICA

L'analisi seguente cerca di riordinare in maniera organica le principali informazioni acquisite in fase di ricerca documentale.

Le fonti alle quali si è attinto nella ricerca sono gli archivi comunali e provinciali, specificamente per le opere analizzate, ed una serie di testi riguardanti la tecnica del calcestruzzo armato per quanto attiene alle tecniche costruttive allora utilizzate.

L'obiettivo di tale analisi è stato quello di capire l'evoluzione dell'edificio nel tempo con particolare riferimento all'aspetto strutturale ed edile ad esso correlato: eventuali demolizioni e ricostruzioni, ampliamenti o ricostruzioni di parti anche non strutturali ma aventi particolare interesse al fine strutturale.

La ricerca è partita dalle fonti storiche ed in particolare dalle piante, prospetti e sezioni originali della costruzione datate 1964-1974, periodo della realizzazione dell'edificio, ed è proseguita con l'analisi della documentazione che istituiva le pratiche edilizie e di appalto dei lavori eseguiti nel periodo di costruzione.

In particolare, l'accesso agli atti degli archivi comunali ha consentito di reperire la seguente documentazione:

- Licenza edilizia 1092 del 18/05/1968
- Rinnovo licenza edilizia n. 1188 del 19/07/1969
- Licenza di variante intensiva n. 1614 del 11/12/1970

Vista la scarsità di informazioni relativa ai materiali da costruzione e alle tecniche realizzativa adottate, la Committenza ha richiesto di effettuare un'approfondita campagna di indagini che mirasse alla definizione delle caratteristiche dei materiali, delle varie stratigrafie dei pacchetti edilizi e alla determinazione delle cause di degrado al fine di ricevere una proposta di interventi di ripristino e rinforzo.

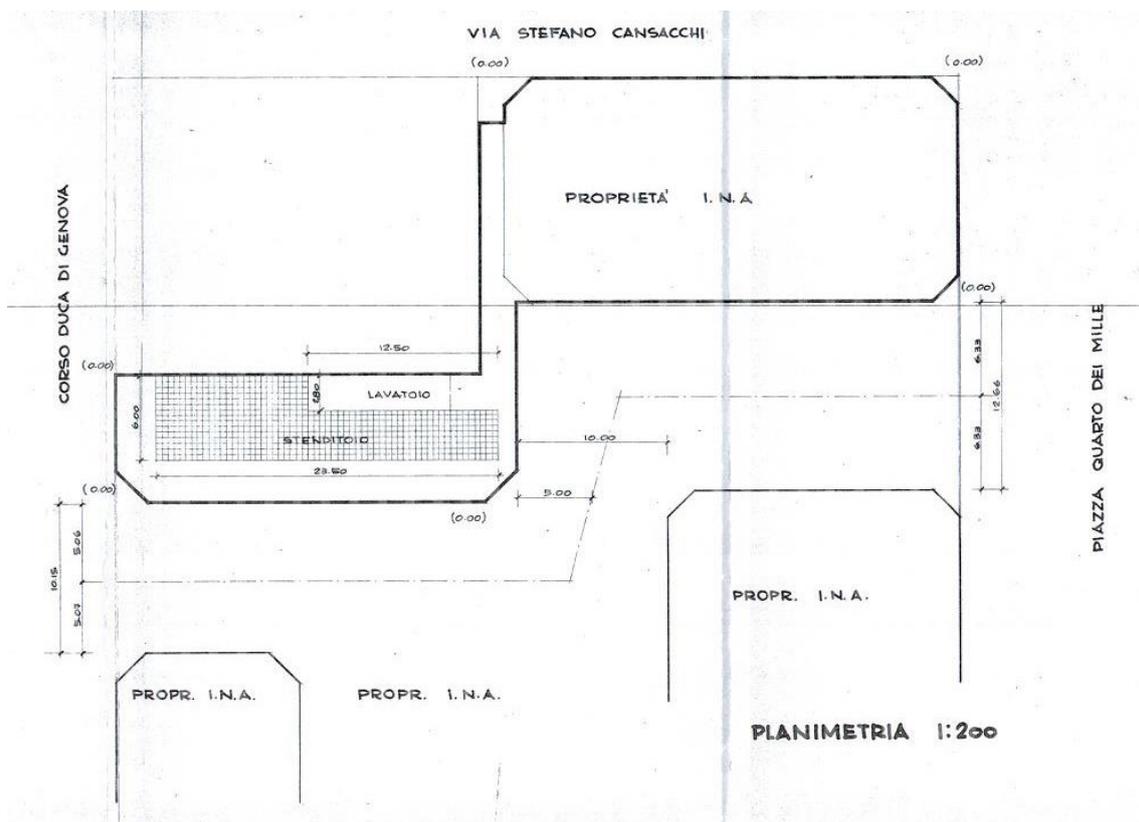


Figura 48 - Planimetria 1:200 del progetto depositato presso gli archivi comunali

6.2.1 RILIEVO METRICO

Fase fondamentale della ricerca e dell'indagine conoscitiva dell'edificio è stata l'acquisizione e composizione dei dati metrici, che hanno permesso e facilitato la lettura verticale e trasversale dell'edificio. È stato condotto un rilievo diretto, tecnica facilmente

utilizzabile poiché richiede strumentazioni tradizionali di misura, e che presuppone una profonda conoscenza del metodo operativo e delle tecniche di acquisizione e di restituzione delle osservazioni.

La prima fase del rilievo metrico è stata la raccolta dei dati sul campo, trascritti sugli eidotipi prodotti, con la distinzione tra il rilievo delle piante prima, e quello degli alzati poi, facilmente recuperabili attraverso le informazioni ottenute dal rilevamento dei diversi piani dell'edificio, migliorati attraverso ulteriori misurazioni. Il rilievo planimetrico è stato condotto con una metodologia di misurazione diretta, utilizzando apparecchiature semplici e comuni, che tuttavia nasconde la complessità delle operazioni da compiere, ulteriormente amplificate dall'articolazione dell'edificio.

6.2.2 RILIEVO PATOLOGICO

Successivamente all'analisi storica e all'acquisizione di dati documentali è stato possibile eseguire l'indagine diagnostica, articolata in una prima analisi patologica dell'edificio e seguita, poi, da indagini non distruttive o poco distruttive sugli elementi strutturali.

Da un esame visivo svolto in fase di sopralluogo è stato rilevato un diffuso degrado, manifestato sugli elementi in c.a. facciavista, sottoforma di macchie di ruggine, di fessurazione lungo la direzione delle armature interessate dalla corrosione e di espulsione del calcestruzzo del copriferro.

Le strutture interessate dai fenomeni di degrado rilevati sono le pareti perimetrali esposte quindi all'ambiente esterno e che pertanto alternano periodi in cui le superfici si presentano asciutte ed altri in cui tendono a saturarsi di acqua.

L'espulsione del copriferro e di conseguenza la corrosione delle armature sono fenomeni di degrado promossi dall'azione aggressiva dell'anidride carbonica presente nell'aria. La CO₂ diffondendosi nella matrice cementizia va ad abbassare il pH al di sotto di 11, valore limite oltre il quale il film protettivo delle barre d'armatura viene neutralizzato, esponendo queste ultime al rischio di corrosione. Il fenomeno corrosivo delle armature è promosso anche dall'azione depassivante del cloruro presente nei sali disgelanti o, come in questo caso, nell'acqua di mare. Il quale va a rompere il film passivante che protegge l'acciaio dalla corrosione quando lo stesso è annegato in una matrice cementizia "sana". Nonostante le cause scatenanti del processo corrosivo dell'acciaio sono imputabili alla presenza di anidride carbonica dell'aria e dal cloruro, la corrosione in realtà è la diretta

conseguenza dell'utilizzo di calcestruzzi scadenti per la realizzazione delle strutture



Figura 49 – Degrado sul prospetto interno (sud)



Figura 50 – Degrado sui balconi d'angolo (sud)



Figura 51 – Degrado sul prospetto sud (fronte mare)



Figura 52 – Degrado sul prospetto nord



Figura 53 – Degrado sul prospetto est

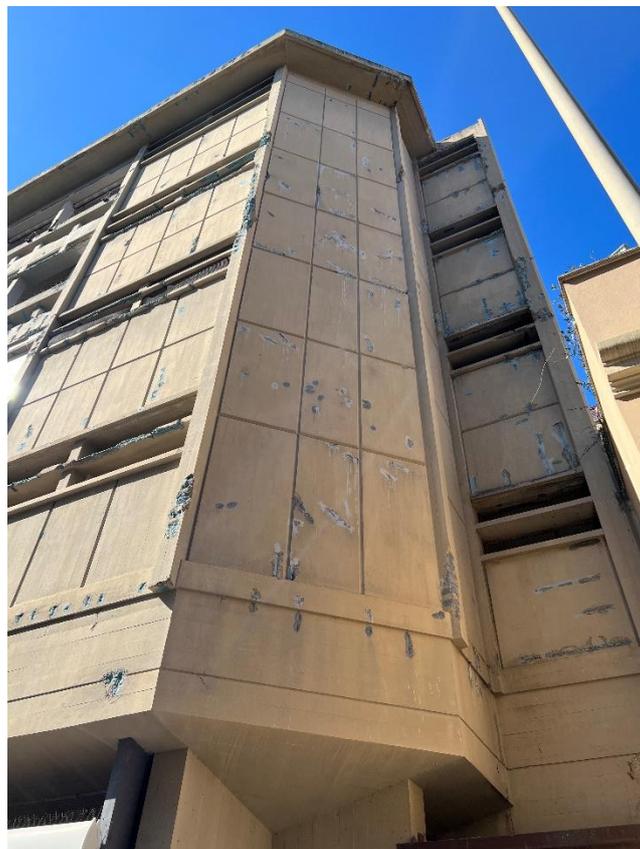


Figura 54 - Figura 55 – Degrado sul prospetto nord-est

I calcestruzzi che hanno una bassa resistenza meccanica, infatti, sono caratterizzati da una elevata porosità che rende facile l'accesso delle sostanze aggressive ambientali che sono in grado di raggiungere in poco tempo le armature metalliche e corroderle. Un'ulteriore causa riconducibile alla presenza frequente di questo fenomeno di degrado sulle strutture esistenti è lo spessore ridotto del copriferro degli elementi in c.a.. è bene far presente che la mancata maturazione umida dei getti e la conseguente formazione di cavillature superficiali possono favorire il rapido ingresso di sostanze aggressive che compromettono i ferri. Infine, un'ultima causa è da ricercare negli eventuali errori di progettazione della raccolta e nello smaltimento delle acque meteoriche le quali, favorendo il ristagno e il ruscellamento delle stesse in alcuni punti preferenziali della struttura, corrodono gli elementi in calcestruzzo armato fino a raggiungere le barre d'armatura e provocare un distacco del copriferro da queste ultime.

Al fine di determinare e validare l'ipotesi delle cause di degrado osservato sull'edificio, si è reso opportuno programmare una campagna di indagini strumentali da effettuarsi in situ.

6.3 INDAGINI IN SITU

Le prove diagnostiche eseguite sull'edificio preso in esame hanno permesso di integrare e acquisire informazioni relative alle proprietà dei materiali e alle cause di degrado in corso, non deducibili dal solo esame visivo, utilizzando le metodologie di indagine non distruttive e parzialmente distruttive di seguito riportate:

- Prove magnetometriche per la localizzazione delle barre di armatura;
- Prelievo di campioni cilindrici di cls;
- Rilievo colorimetrico della profondità di carbonatazione mediante gli indicatori di pH timolftaleina e fenolftaleina;
- Rilievo colorimetrico del fronte di avanzamento degli ioni cloruro;
- Prova di estrazione Pull out
- Prove endoscopiche

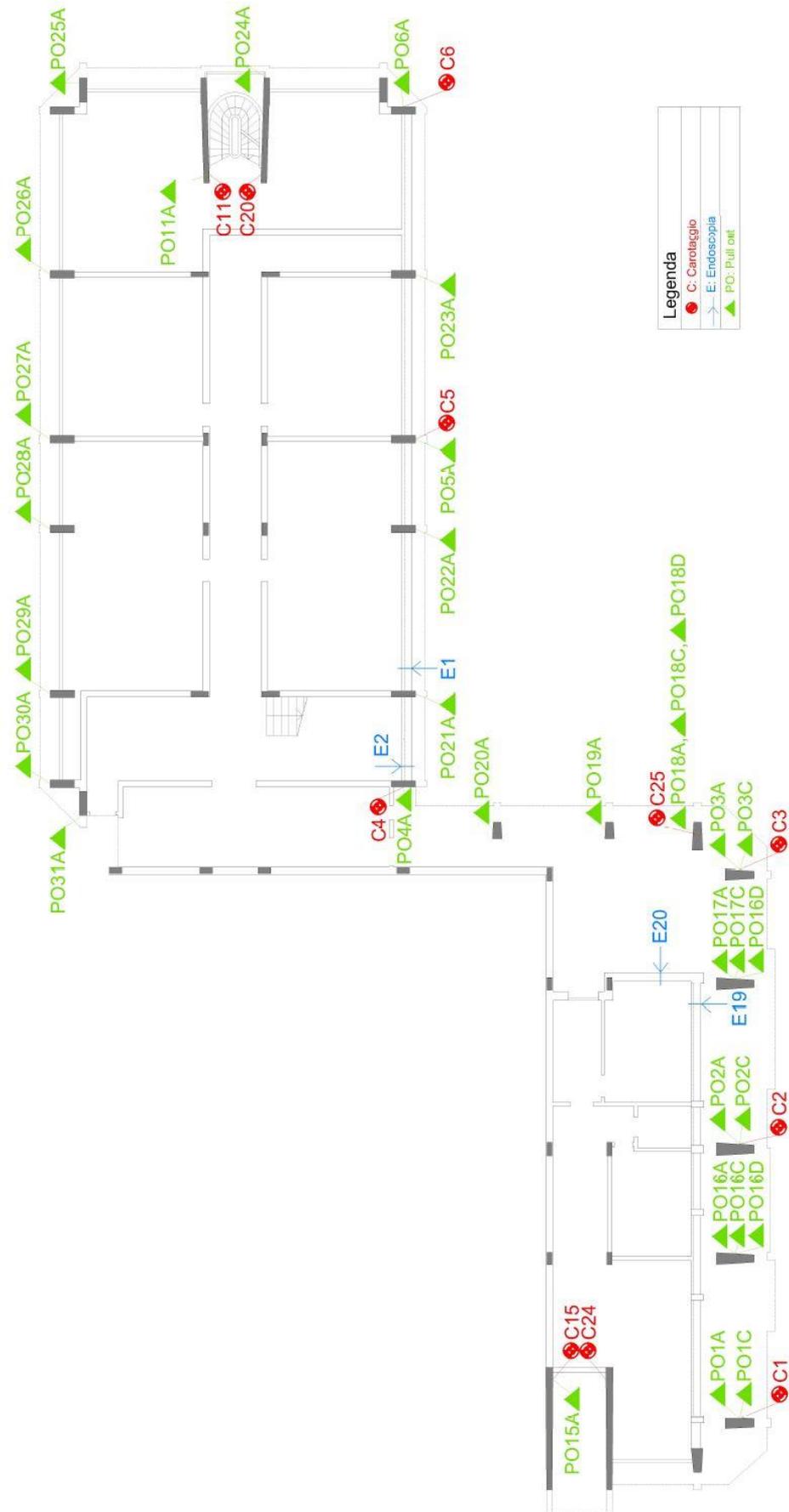


Figura 56 - Indagini Piano terra

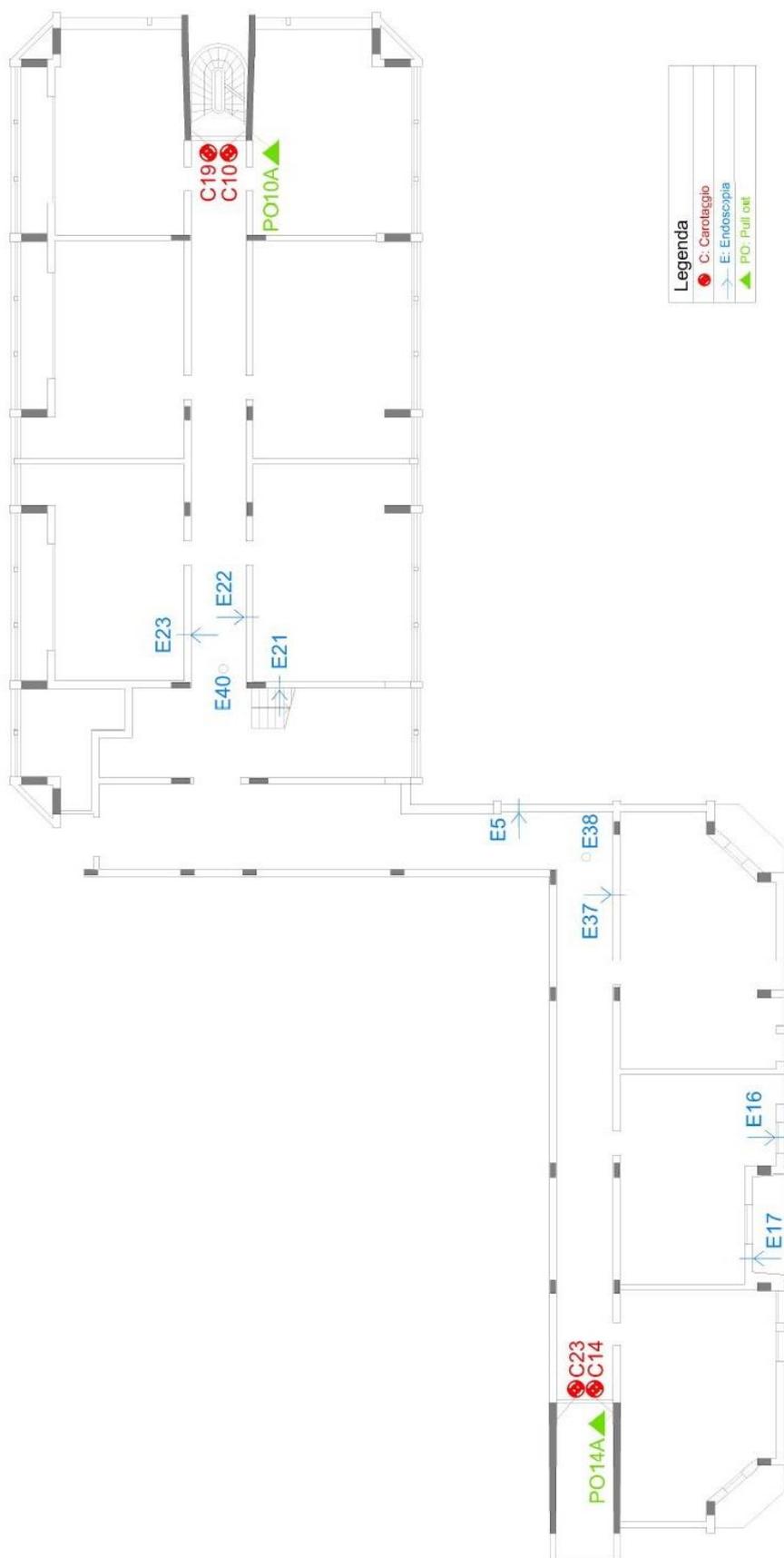


Figura 57 - Indagini Piano primo

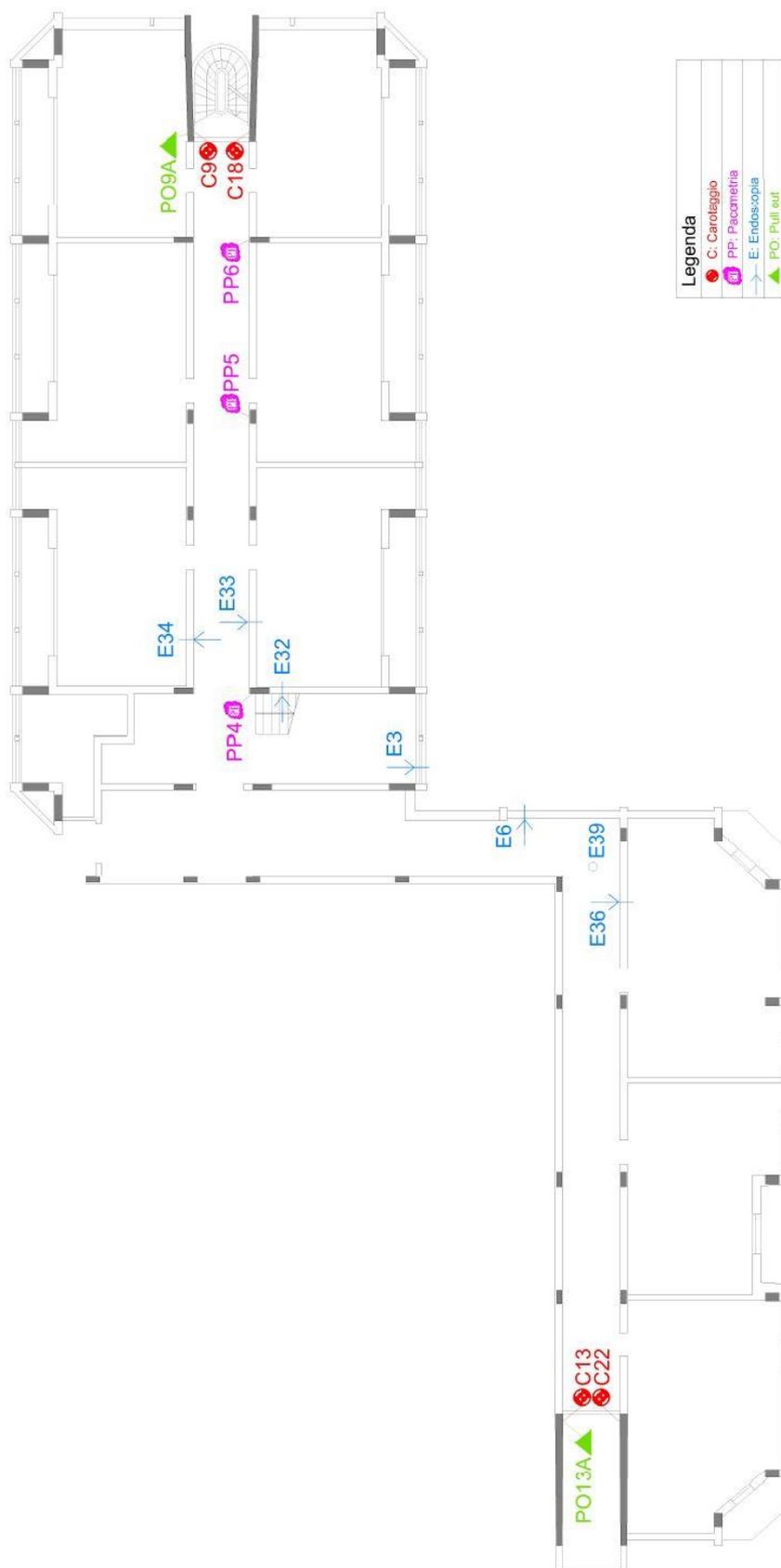


Figura 58 - Indagini Piano secondo

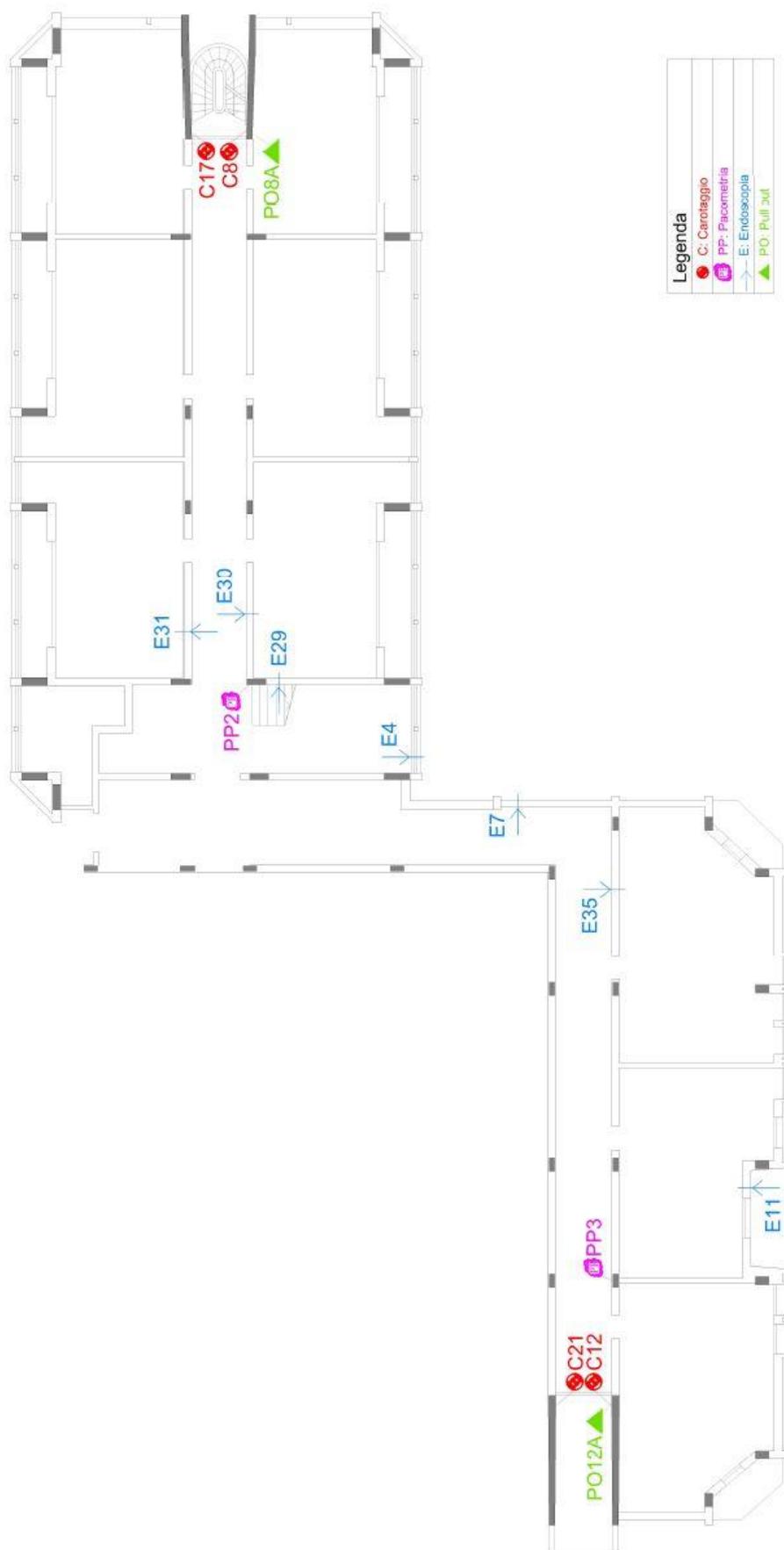


Figura 59 - Indagini Piano terzo

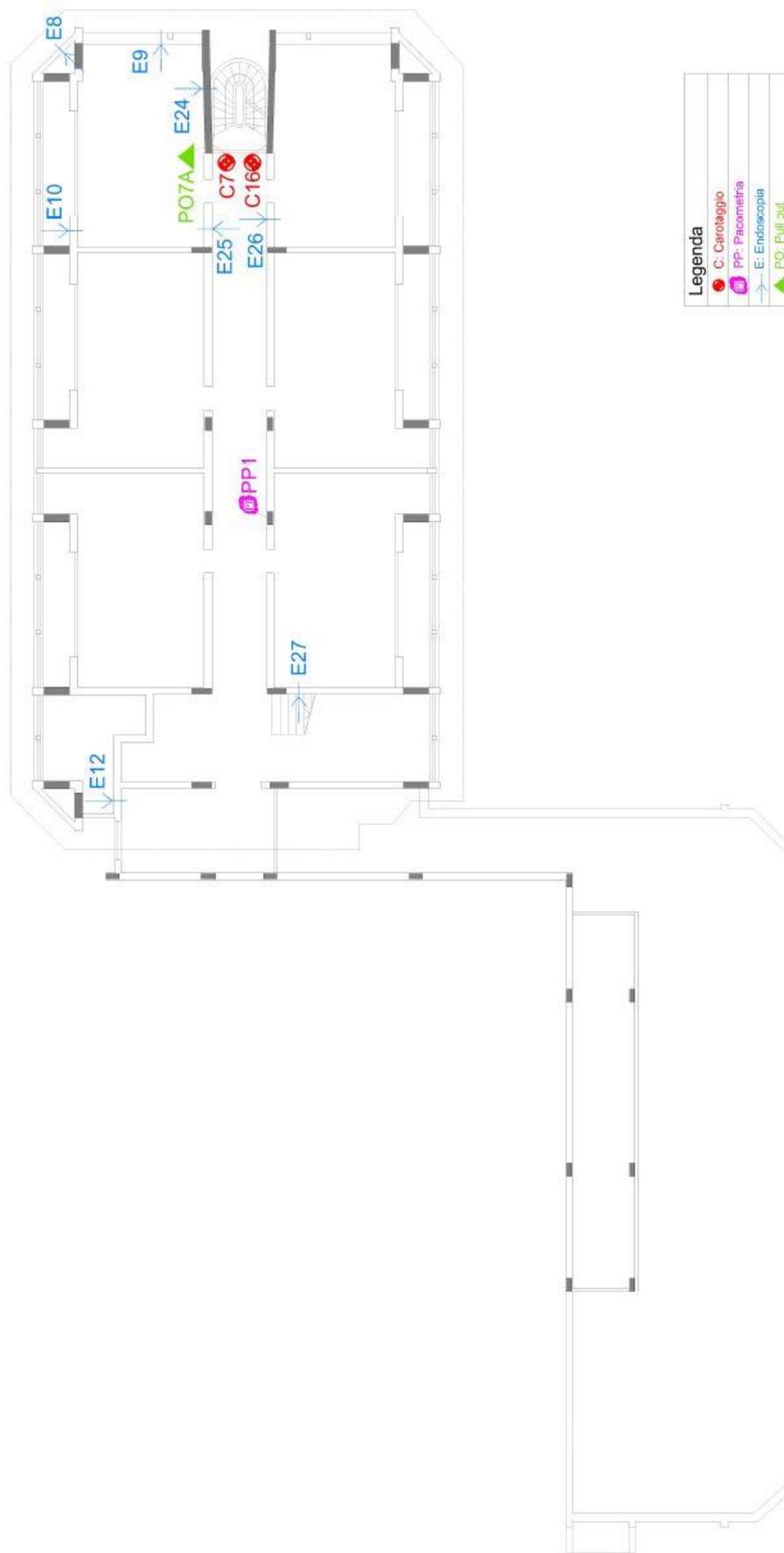


Figura 60 - Indagini Piano quarto

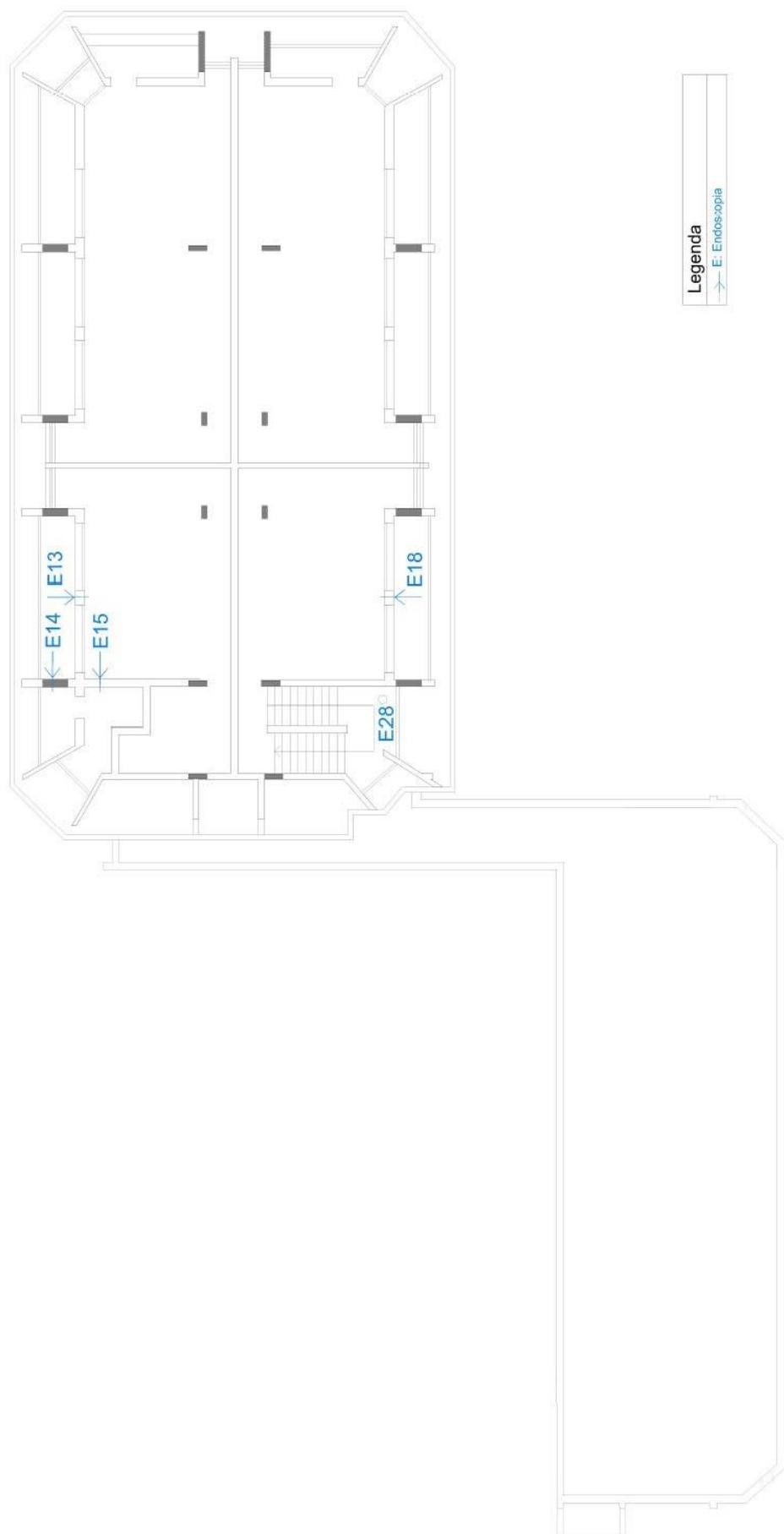


Figura 61 - Indagini Piano attico

6.3.1 Prove magnetometriche

6.3.1.1 Apparecchiatura

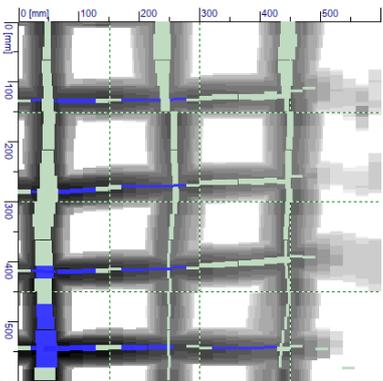
Per l'esecuzione delle prove magnetometriche per la localizzazione delle barre di armatura in elementi in c.a. è stato utilizzato il Ferroskan PS200S della HILTI corredato di schermo, pachometro multifunzione che consente di determinare:

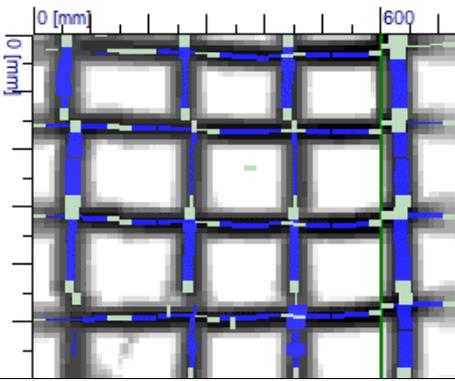
- Localizzazione e distribuzione dei ferri di armatura
- Misura dello spessore del copriferro
- Misura del diametro di barre e staffe
- Ricostruzione grafica della griglia
- Visualizzazione dei ferri in sezione per la valutazione dello scostamento dal copriferro noto per ogni barra o staffa

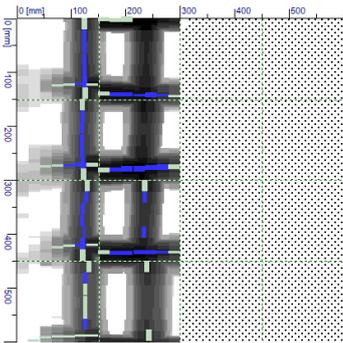


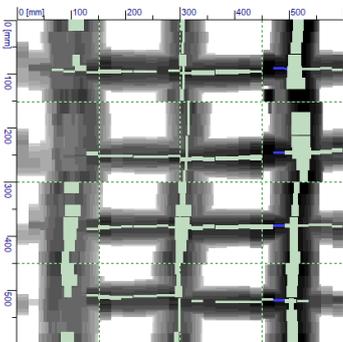
Figura 62 - Ferroskan PS200S e schermo digitale

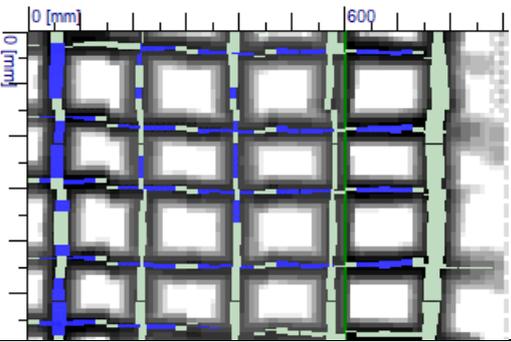
6.3.1.2 Risultati

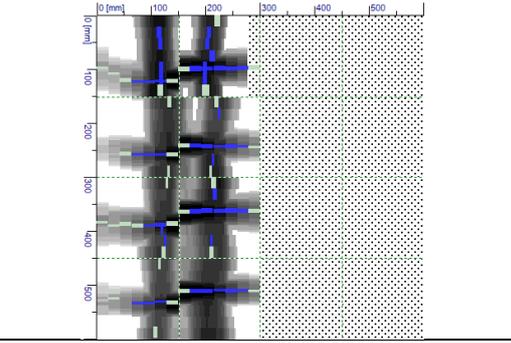
ID Prova	Elemento	Piano	Lato [cm]	Ferri			Staffe		
				Stima Ø [mm]	Coprif. [mm]	Tipologia	Stima Ø [mm]	Passo [mm]	Tipologia
PP1	Pilastro	4	50	3 Ø14÷16	46	n.r.	6÷8	10/15	n.r.
									
<i>Punto di indagine</i>				<i>Output strumentale</i>					

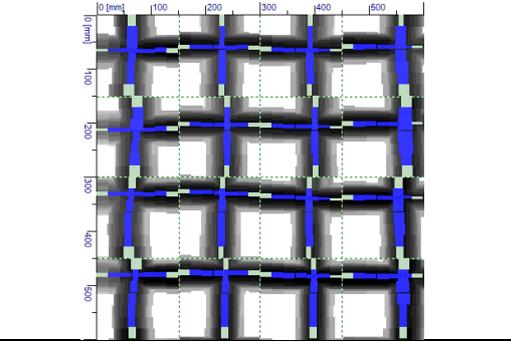
ID Prova	Elemento	Piano	Lato [cm]	Ferri			Staffe		
				Stima Ø [mm]	Coprif. [mm]	Tipologia	Stima Ø [mm]	Passo [mm]	Tipologia
PP2	Pilastro	3	70	4 Ø14÷16	32	n.r.	6÷8	10/15	n.r.
 <p>Punto di indagine</p>				 <p>Output strumentale</p>					

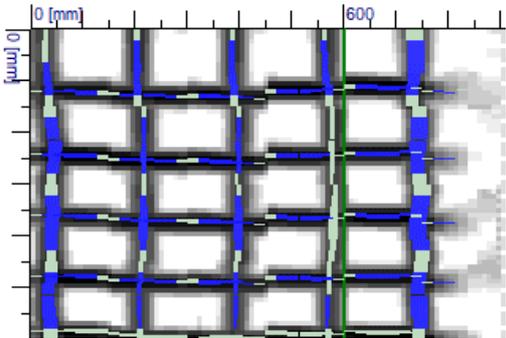
ID Prova	Elemento	Piano	Lato [cm]	Ferri			Staffe		
				Stima Ø [mm]	Coprif. [mm]	Tipologia	Stima Ø [mm]	Passo [mm]	Tipologia
PP2	Pilastro	3	20	2 Ø14÷16	45	n.r.	6÷8	10/15	n.r.
 <p>Punto di indagine</p>				 <p>Output strumentale</p>					

ID Prova	Elemento	Piano	Lato [cm]	Ferri			Staffe		
				Stima Ø [mm]	Coprif. [mm]	Tipologia	Stima Ø [mm]	Passo [mm]	Tipologia
PP3	Pilastro	3	50	3 Ø14÷16	45	n.r.	6÷8	10/15	n.r.
 <p>Punto di indagine</p>				 <p>Output strumentale</p>					

ID Prova	Elemento	Piano	Lato [cm]	Ferri			Staffe		
				Stima Ø [mm]	Coprif. [mm]	Tipologia	Stima Ø [mm]	Passo [mm]	Tipologia
PP4	Pilastro	2	80	5 Ø14÷16	43	n.r.	6÷8	15	n.r.
 <p>Punto di indagine</p>				 <p>Output strumentale</p>					

ID Prova	Elemento	Piano	Lato [cm]	Ferri			Staffe		
				Stima Ø [mm]	Coprif. [mm]	Tipologia	Stima Ø [mm]	Passo [mm]	Tipologia
PP4	Pilastro	2	20	2 Ø14÷16	45	n.r.	6÷8	15	n.r.
 <p>Punto di indagine</p>				 <p>Output strumentale</p>					

ID Prova	Elemento	Piano	Lato [cm]	Ferri			Staffe		
				Stima Ø [mm]	Coprif. [mm]	Tipologia	Stima Ø [mm]	Passo [mm]	Tipologia
PP5	Pilastro	2	60	4 Ø14÷16	43	n.r.	8÷10	10	n.r.
 <p>Punto di indagine</p>				 <p>Output strumentale</p>					

ID Prova	Elemento	Piano	Lato [cm]	Ferri			Staffe		
				Stima Ø [mm]	Coprif. [mm]	Tipologia	Stima Ø [mm]	Passo [mm]	Tipologia
PP6	Pilastro	2	70	5 Ø14+16	28	n.r.	8÷10	10/15	n.r.
									
Punto di indagine				Output strumentale					

6.3.2 Prelievo di campioni cilindrici di calcestruzzo

6.3.2.1 Apparecchiatura

Per l'estrazione delle carote è stata utilizzata la Carotatrice diamantata DD120 della Hilti montata con relativo supporto di perforazione. La macchina consente di estrarre provini di cls da 16 a 162 mm (5/8 - 6-3/8") di diametro. In questo caso è stata utilizzata una corona diamantata a umido CUTS DIAMANT da 99 mm di diametro interno.



Figura 63 - Carotatrice DD120 Hilti e corona diamantata

6.3.2.2 Risultati

ID Provino	Elemento	Piano	Diametro provino [mm]	Diametro max aggregato [mm]	Anomalie (fessure, nidi di ghiaia..etc.)
C1	Pilastro	PT	99	25	n.p.
C2	Pilastro	PT	99	25	n.p.
C3	Pilastro	PT	99	34	nidi di ghiaia/vacuoli
C4	Pilastro	PT	99	37	vacuoli
C5	Pilastro	PT	99	34	vacuoli
C6	Pilastro	PT	99	37	vacuoli

C7	Setto	P4	99	44	vacuoli
C8	Setto	P3	99	27	nidi di ghiaia/vacuoli
C9	Setto	P2	99	32	nidi di ghiaia/vacuoli
C10	Setto	P1	99	34	nidi di ghiaia/vacuoli
C11	Setto	PT	99	29	vacuoli
C12	Setto	P3	99	36	vacuoli
C13	Setto	P2	99	22	nidi di ghiaia/vacuoli
C14	Setto	P1	99	25	n.p.
C15	Setto	PT	99	25	n.p.
C16	Setto	P4	78	>25	nidi di ghiaia/vacuoli
C17	Setto	P3	78	>25	vacuoli
C18	Setto	P2	78	>25	nidi di ghiaia/vacuoli
C19	Setto	P1	78	>25	vacuoli
C20	Setto	PT	78	>25	vacuoli
C21	Setto	P3	78	>25	vacuoli
C22	Setto	P2	78	>25	n.p.
C23	Setto	P1	78	>25	n.p.
C24	Setto	PT	78	>25	vacuoli
C25	Pilastro	PT	78	>25	vacuoli

6.3.2.3 Documentazione fotografica



C1 – Prelievo



C2 – Prelievo



C3 – Prelievo



C4 – Prelievo



C6 – Prelievo



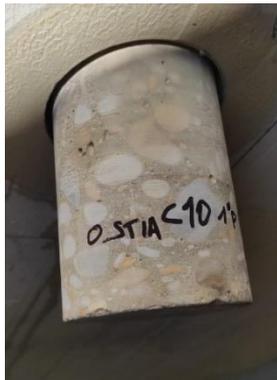
C7 – Prelievo



C8 – Prelievo



C9 – Punto di indagine



C10 – Prelievo



C11 – Prelievo



C12 – Prelievo



C13 – Prelievo



C14 – Prelievo



C15 – Prelievo



C16 – Prelievo



C17 – Prelievo



C18 – Prelievo



C19 – Prelievo



C20 – Prelievo



C21 – Prelievo



C22 – Prelievo



C23 – Prelievo



C24 – Prelievo



C25 – Prelievo

6.3.3 Rilievo colorimetrico del fronte di carbonatazione

Per quanto riguarda la prova di carbonatazione è stato condotto uno studio di confronto tra l'utilizzo della fenolftaleina, agente cancerogeno il cui utilizzo ai fini diagnostici è regolamentato dalla UNI EN 14630:2007, e la timolftaleina, allo scopo di comprenderne le differenze nei risultati per poter proporre l'utilizzo di un agente non nocivo per gli operatori PnD.

6.3.3.1 Reagenti

- Fenolftaleina in soluzione alcol etilico 1%
- Timolftaleina in soluzione idroalcolica 1% .

	FENOLFTALEINA	TIMOLFTALEINA
Formula molecolare	C20 H14 O4	C28H30O4
Intervallo di viraggio	8,3-10,0	9,0-10,5
Colore forma acida	Incolore	Incolore
Colore forma basica	Rosso-fucsia	Blu
Densità	0.923	0.88
Pericoli		

6.3.3.2 Analisi colorimetrica con fenolftaleina

ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C1	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	99
d_{k1}	d_{k2}	d_{k3}	d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	d_{k7}	d_{k8}	d_{k9}	d_{k10}
20	25	23	25	20	18	20	16	19	18
Profondità massima d_{k,max}			25		Profondità media d_{k,media}			20,4	

ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C2	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	99
d_{k1}	d_{k2}	d_{k3}	d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	d_{k7}	d_{k8}	d_{k9}	d_{k10}
25	15	15	15	19	16	19	18	20	20
Profondità massima d_{k,max}			25		Profondità media d_{k,media}			18,2	

ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C3	Pilastro		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	99
d_{k1}	d_{k2}	d_{k3}	d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	d_{k7}	d_{k8}	d_{k9}	d_{k10}
14	12	12	12	13	13	11	12	10	10
Profondità massima d_{k,max}			14		Profondità media d_{k,media}			11,8	

ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C4	Pilastro		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	99
d_{k1}	d_{k2}	d_{k3}	d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	d_{k7}	d_{k8}	d_{k9}	d_{k10}
25	23	16	15	16	13	13	23	23	22
Profondità massima d_{k,max}			25		Profondità media d_{k,media}			18,9	

ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C5	Pilastro		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	99
d_{k1}	d_{k2}	d_{k3}	d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	d_{k7}	d_{k8}	d_{k9}	d_{k10}
23	20	21	20	19	18	18	18	21	20
Profondità massima d_{k,max}			23		Profondità media d_{k,media}			19,8	

ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C6	Pilastro		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	99
d_{k1}	d_{k2}	d_{k3}	d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	d_{k7}	d_{k8}	d_{k9}	d_{k10}
21	19	20	21	22	17	24	14	11	14
Profondità massima d_{k,max}			24		Profondità media d_{k,media}			18,3	

ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C7	Setto	P4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	99
d_{k1}	d_{k2}	d_{k3}	d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	d_{k7}	d_{k8}	d_{k9}	d_{k10}
21	23	10	10	14	10	14	10	21	23
Profondità massima d_{k,max}			23		Profondità media d_{k,media}			16,6	

ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C8	Setto	P3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	99
d_{k1}	d_{k2}	d_{k3}	d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	d_{k7}	d_{k8}	d_{k9}	d_{k10}
23	19	18	24	14	22	15	22	12	25
Profondità massima d_{k,max}			25		Profondità media d_{k,media}			19,4	

ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C9	Setto	P2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	99
d_{k1}	d_{k2}	d_{k3}	d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	d_{k7}	d_{k8}	d_{k9}	d_{k10}
20	14	18	29	19	6	2	18	13	15
Profondità massima d_{k,max}			29		Profondità media d_{k,media}			15,4	

ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C10	Setto	P1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	99
d_{k1}	d_{k2}	d_{k3}	d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	d_{k7}	d_{k8}	d_{k9}	d_{k10}
8	7	7	10	20	16	7	20	16	11
Profondità massima d_{k,max}			20		Profondità media d_{k,media}			12,2	

ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C11	Setto	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	99
d_{k1}	d_{k2}	d_{k3}	d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	d_{k7}	d_{k8}	d_{k9}	d_{k10}
27	10	15	24	9	11	26	24	20	22
Profondità massima d_{k,max}			27		Profondità media d_{k,media}			17,4	

ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C12	Setto	P3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	99
d_{k1}	d_{k2}	d_{k3}	d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	d_{k7}	d_{k8}	d_{k9}	d_{k10}
13	9	15	13	14	14	15	12	4	9
Profondità massima d_{k,max}			15		Profondità media d_{k,media}			11,8	

ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C13	Setto	P2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	99
d_{k1}	d_{k2}	d_{k3}	d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	d_{k7}	d_{k8}	d_{k9}	d_{k10}
17	27	35	25	26	37	36	39	41	24
Profondità massima d_{k,max}			39		Profondità media d_{k,media}			30,7	

ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C14	Setto	P1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	99
d_{k1}	d_{k2}	d_{k3}	d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	d_{k7}	d_{k8}	d_{k9}	d_{k10}
51	50	51	51	49	48	51	48	41	49
Profondità massima d_{k,max}			51		Profondità media d_{k,media}			48,9	

ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C15	Setto	PT	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	99
d_{k1}	d_{k2}	d_{k3}	d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	d_{k7}	d_{k8}	d_{k9}	d_{k10}
22	20	12	25	27	22	20	10	20	14
Profondità massima d_{k,max}			27		Profondità media d_{k,media}			19,2	

Oltre a rilevare il profilo colorimetrico sulla superficie esterna delle carote è stata effettuata la prova di carbonatazione anche sulle superfici di frattura, ottenute in seguito alla prova di estrazione pull-out, utilizzando la fenolftaleina e la timolftaleina.

Indicatore FENOLFTALEINA									
ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Profondità media d _{k,media} [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
PO1-A	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	15
PO2-A	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	21
PO3-A	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	20
PO4-A	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	22
PO5-A	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	20
PO6-A	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	20
PO7-A	Setto	P4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	23
PO8-A	Setto	P3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	18
PO9-A	Setto	P2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	22
PO10-A	Setto	P1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	15
PO11-A	Setto	PT	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	23
PO12-A	Setto	P3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	15
PO13-A	Setto	P2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	20
PO14-A	Setto	P1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	30
PO15-A	Setto	PT	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	25
PO16-A	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	20
PO17-A	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	15
PO18-A	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	15
PO19-A	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	15
PO20-A	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	18
PO21-A	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	>50
PO22-A	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	15
PO23-A	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	16
PO24-A	Setto	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	20
PO25-A	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	20
PO26-A	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	25

PO27-A	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	25
PO28-A	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	23
PO29-A	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	20
PO30-A	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	23
PO31-A	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	20

Indicatore TIMOLFTELEINA									
ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Profondità media
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	$d_{k,media}$ [mm]
PO1-C	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	15
PO2-C	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	20
PO3-C	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	20
PO4-C	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	15
PO5-C	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	18
PO6-C	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	16
PO16-C	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	20
PO16-D	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	20
PO17-C	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	13
PO17-D	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	14
PO18-C	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	15
PO18-D	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	16
PO19-C	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	16
PO19-D	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	20
PO20-C	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	14
PO20-D	Pilastro	PT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	18

6.3.3.3 Confronto colorimetrica fenolftealeina-timolftealeina

Il confronto diretto tra i due indicatori è stato effettuato su 10 carote di 78 mm di diametro sottoposte a frattura longitudinale, anche detta “Prova brasiliana”, eseguita

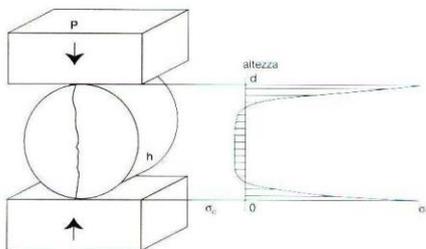


Figura 64 -

secondo lo schema indicato in *Figura 64*.

La prova brasiliana prevede la compressione longitudinale lungo due generatrici diametralmente opposte di un provino generalmente cilindrico. Nel piano diametrale contenente la retta di carico si genera a rottura una tensione rappresentativa della resistenza a trazione del calcestruzzo. La frattura è stata generata grazie a un sistema di

carico allestito e comprensivo di martinetto idraulico collegato a una pompa manuale su cui è installato un manometro digitale.



Figura 65 - (Adx) Sistema idraulico utilizzato

Figura 66 - (A sx) Esecuzione della frattura splitting

Delle due facce così ottenute una è stata sottoposta alla prova di carbonatazione mentre l'altra è stata sottoposta alla prova di determinazione del profilo ioni cloruro esposta nel paragrafo successivo. Di seguito si espongono i risultati del confronto ottenuto con i due indicatori.

ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C16-sub1	Setto	P4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	78
FENOLFTALEINA				TIMOLFTALEINA					
d_{k1}	d_{k2}	d_{k3}	d_{k,media}		d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	d_{k,media}	
10	14	15	13		15	15	14	14,5	

Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C17-sub1	Setto	P3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	78
FENOLFTALEINA				TIMOLFTALEINA					
d_{k1}	d_{k2}	d_{k1}	d_{k,media}		d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	d_{k,media}	
10	9	10	9.7		10	14	9	11	

ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C18-sub1	Setto	P2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	78
FENOLFTALEINA				TIMOLFTALEINA					
d_{k1}	d_{k2}	d_{k1}	d_{k,media}		d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	d_{k,media}	
14	12	13	13		15	13	14	14	

ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C19-sub1	Setto	P1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	78
FENOLFTALEINA				TIMOLFTALEINA					
d_{k1}	d_{k2}	d_{k1}	d_{k,media}		d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	d_{k,media}	
14	15	14	13.3		10	5	9	8	

ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C20-sub1	Setto	PT	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	78
FENOLFTALEINA				TIMOLFTALEINA					
d_{k1}	d_{k2}	d_{k1}	d_{k,media}		d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	d_{k,media}	
30	31	31	30.7		30	34	30	31.3	

ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C21-sub1	Setto	P3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	78
FENOLFTALEINA				TIMOLFTALEINA					
d_{k1}	d_{k2}	d_{k1}	d_{k,media}		d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	d_{k,media}	
29	26	24	26.3		23	25	26	24.7	

ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C22-sub1	Setto	P2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	78
FENOLFTALEINA				TIMOLFTALEINA					
d_{k1}	d_{k2}	d_{k1}	d_{k,media}		d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	d_{k,media}	
22	21	20	21		20	21	20	20.3	

ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C23-sub1	Setto	P1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	78
FENOLFTALEINA				TIMOLFTALEINA					
d_{k1}	d_{k2}	d_{k1}	d_{k,media}		d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	d_{k,media}	
36	36	34	35.3		36	36	35	35.7	

ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C24-sub1	Setto	PT	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	78
FENOLFTALEINA				TIMOLFTALEINA					
d_{k1}	d_{k2}	d_{k1}	d_{k,media}		d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	d_{k,media}	
20	16	18	18		16	18	19	17.7	

ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C25-sub1	Pilastro	PT	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	78
FENOLFTALEINA				TIMOLFTALEINA					
d_{k1}	d_{k2}	d_{k1}	d_{k,media}		d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	d_{k,media}	
17	15	16	16		16	15	15	15.3	

6.3.3.4 Documentazione fotografica



C16-sub1



C17-sub1



C18-sub1



C19-sub1



C20-sub1



C21-sub1



C22-sub1



C23-sub1



C24-sub1



C25-sub1

6.3.4 Rilievo della profondità di penetrazione degli ioni cloruro

6.3.4.1 Reagenti

- Soluzione NaOH
- Soluzione AgNO₃

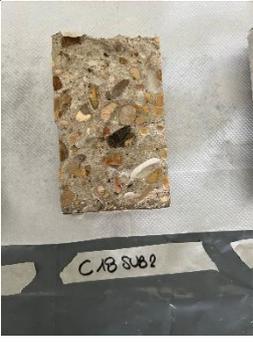
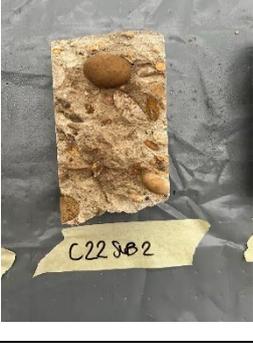
6.3.4.2 Risultati

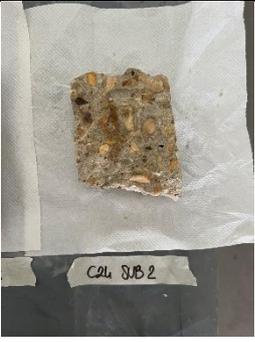
ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C16-sub2	Setto	P4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	78
d_{k1}	d_{k2}	d_{k3}	d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	Valore max [mm]		Profondità media d_{k,media} [mm]	
20	20	10	17	18	16	20		16.8	
ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C17-sub2	Setto	P3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	78
d_{k1}	d_{k2}	d_{k3}	d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	Valore max [mm]		Profondità media d_{k,media} [mm]	
20	18	16	14	12	12	20		15.3	
ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C18-sub2	Setto	P2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	78
d_{k1}	d_{k2}	d_{k3}	d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	Valore max [mm]		Profondità media d_{k,media} [mm]	
16	15	17	15	12	15	17		15	
ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C19-sub2	Setto	P1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	78
d_{k1}	d_{k2}	d_{k3}	d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	Valore max [mm]		Profondità media d_{k,media} [mm]	
14	14	14	8	9	9			11.3	
ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C20-sub2	Setto	PT	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	78
d_{k1}	d_{k2}	d_{k3}	d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	Valore max [mm]		Profondità media d_{k,media} [mm]	
30	31	31	33	32	31	32		31.3	
ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C21-sub2	Setto	P4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	78
d_{k1}	d_{k2}	d_{k3}	d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	Valore max [mm]		Profondità media d_{k,media} [mm]	
31	29	29	30	30	26	31		29.2	

ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C22-sub2	Setto	P3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	78
d_{k1}	d_{k2}	d_{k3}	d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	Valore max [mm]		Profondità media d_{k,media} [mm]	
21	21	22	22	19	18	22		20.5	
ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C23-sub2	Setto	P2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	78
d_{k1}	d_{k2}	d_{k3}	d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	Valore max [mm]		Profondità media d_{k,media} [mm]	
32	34	35	36	36	37	37		35	
ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C24-sub2	Setto	P1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	78
d_{k1}	d_{k2}	d_{k3}	d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	Valore max [mm]		Profondità media d_{k,media} [mm]	
Non idonea									
ID Provino	Elemento	Piano	Esposizione				Provino		Diametro [mm]
			Riparato	Esposto	Interno	Esterno	Carota	Sup. frattura	
C25-sub2	Setto	PT	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	78
d_{k1}	d_{k2}	d_{k3}	d_{k4}	d_{k5}	d_{k6}	Valore max [mm]		Profondità media d_{k,media} [mm]	
11	10	9	15	16	18	18		13.2	

6.3.4.3 Documentazione fotografica

Id Provino	Giorno 0	Giorno 7
C16-sub2		
C17-sub2		

C18-sub2		
C19-sub2		
C20-sub2		
C21-sub2		
C22-sub2		

C23-sub2		
C24-sub2		
C25-sub2		

6.3.5 Prova di estrazione Pull out

6.3.5.1 Apparecchiatura

La strumentazione utilizzata è composta da:

- Pacometro HILTI Ferrosan PS200S
- Trapano a percussione Makita munito di centratore per foro (1);
- Fresatrice con adattatore Makita (2);
- Tasselli Thoro (3);
- Martinetto oleodinamico OMCN 366 da 12 ton cavo con anello portante (4);
- Pompa manuale e tubo idraulico flessibile ad alta pressione (5)(6);
- Manometro digitale A.E.P. Bit02B-PGE 700 bar (7);
- Utensili vari (mazzetta, soffiETTO) (8)

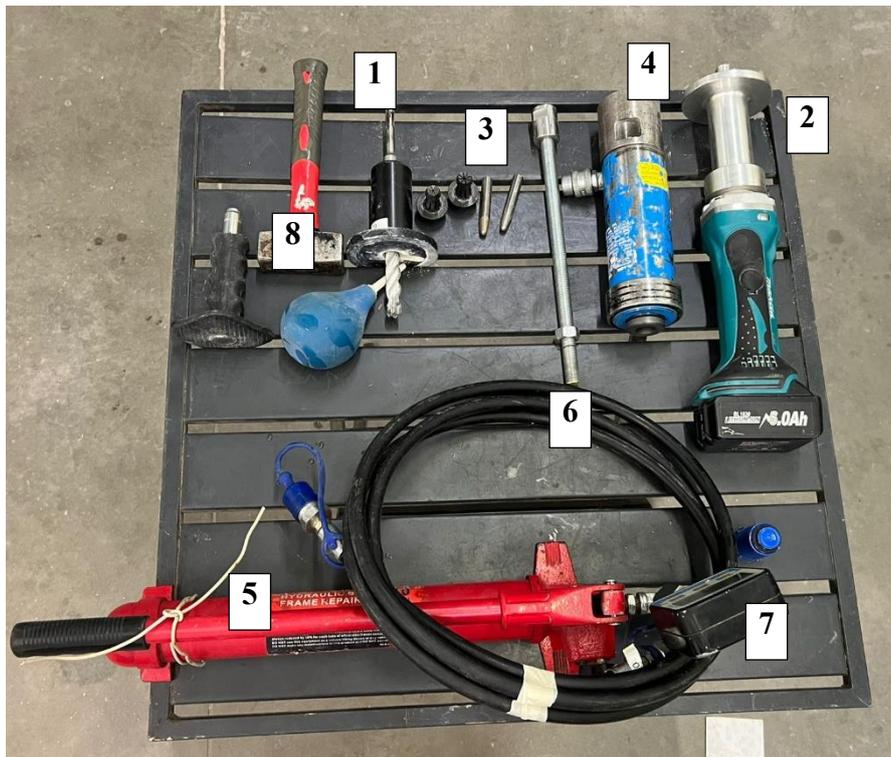


Figura 67 -Apparecchiatura prova di Pull out

6.3.5.2 Risultati

Il parametro ottenuto dalle operazioni di prova è la pressione esercitata dal martinetto per estrarre il tassello. Il valore della forza di estrazione in kN è ricavato dall'equazione di interpolazione di 2° grado riportata nel certificato di taratura del martinetto. Di seguito si riportano sinteticamente i risultati ottenuti.

ID prova	Ubicazione	Elemento	Pressione [bar]	Forza di estrazione [kN]	Rc Carotaggio Rcc [Mpa]
P01-A	Pilastro	PT	151,8	26,2	16,60
P01-C	Pilastro	PT	159,4	27,5	16,60
P02-A	Pilastro	PT	168,1	29,0	17,30
P02-C	Pilastro	PT	163,9	28,3	17,30
P03-A	Pilastro	PT	155,4	26,8	16,50
P03-C	Pilastro	PT	164,5	28,4	16,50
P04-A	Pilastro	PT	150,2	25,9	16,20
P04-C	Pilastro	PT	152,4	26,3	16,20
P05-A	Pilastro	PT	158,3	27,3	15,60
P05-C	Pilastro	PT	150,2	25,9	15,60
P06-A	Pilastro	PT	144,3	24,9	16,70
P06-C	Pilastro	PT	155,9	26,9	16,70
P07-A	Setto	P4	168,8	29,1	19,30
P08-A	Setto	P3	186,2	32,1	21,10
P09-A	Setto	P2	146,0	25,2	16,90
P010-A	Setto	P1	159,1	27,5	16,60
P011-A	Setto	PT	152,1	26,3	15,40
P012-A	Setto	P3	176,6	30,5	20,30
P013-A	Setto	P2	165,4	28,6	19,70
P014-A	Setto	P1	173,5	30,0	19,20

P015-A	Setto	P1	146,1	25,2	15,90
P016-A	Pilastro	PT	181,5	31,3	-
P016-C	Pilastro	PT	178,3	30,8	-
P016-D	Pilastro	PT	173,0	29,9	-
P017-A	Pilastro	PT	172,7	29,8	-
P017-C	Pilastro	PT	184,1	31,8	-
P017-D	Pilastro	PT	187,3	32,3	-
P018-A	Pilastro	PT	195,5	33,7	-
P018-C	Pilastro	PT	156,1	26,9	-
P018-D	Pilastro	PT	191,3	33,0	-
P019-A	Pilastro	PT	172,6	29,8	-
P019-C	Pilastro	PT	176,4	30,5	-
P019-D	Pilastro	PT	195,2	33,7	-
P020-A	Pilastro	PT	157,9	27,3	-
P020-C	Pilastro	PT	162,0	28,0	-
P020-D	Pilastro	PT	175,3	30,3	-
P021-A	Pilastro	PT	156,2	27,0	-
P022-A	Pilastro	PT	178,6	30,8	-
P023-A	Pilastro	PT	179,1	30,9	-
P024-A	Setto	Setto	174,5	30,1	-
P025-A	Pilastro	PT	179,0	30,9	-
P026-A	Pilastro	PT	150,7	26,0	-
P027-A	Pilastro	PT	187,1	32,3	-
P028-A	Pilastro	PT	176,3	30,4	-
P029-A	Pilastro	PT	194,8	33,6	-
P030-A	Pilastro	PT	179,8	31,0	-
P031-A	Pilastro	PT	185,2	32,0	-

6.3.5.3 Documentazione fotografica



P01-A



P02-A



P03-A



P04-A



P05-A



P06-A



P07-A



P08-A



PO9-A



PO10-A



PO11-A



PO12-A



PO13-A



PO14-A



PO15-A



PO16-A



PO17-A



PO18-A



PO19-A



PO20-A



PO21-A



PO22-A



PO23-A



PO24-A



PO25-A



PO26-A



PO27-A



PO28-A



PO29-A

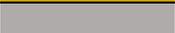


P030-A



PO31-A

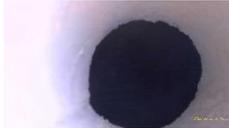
6.3.6 Prove endoscopiche

E1	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	Piano Terra	Parete perimetrale	~ 120	~ 13.5	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	4.0	4.0		Rivestimento	
	5.5	1.5		Malta	
	13.5	8.0		Laterizio forato	
Note	Foro passante				
E2	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	1° piano	Parete perimetrale	~ 20	~ 96	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	2.0	2.0		Intonaco	
	10.0	8.0		Laterizio forato	
	76.0	66.0		Vuoto	
<i>Fondo foro</i>	81.0	>5		Clis	
Note	Ipotesi spessore dell'ultimo elemento in clis: ~ 21 cm				
E3	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	2° piano	Parete perimetrale	~ 10	~ 38	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	1.5	1.5		Intonaco	
	9.5	8.0		Laterizio forato	
	17.0	7.5		Vuoto	
<i>Fondo foro</i>	22.0	>5		Clis	
Note	Ipotesi spessore dell'ultimo elemento in clis: ~ 21 cm				

E4	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	3° piano	Parete perimetrale	~ 20	~ 38	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	1.5	1.5		Intonaco	
	9.5	8.0		Laterizio forato	
	17.0	7.5		Vuoto	
	<i>Fondo foro</i>	22.0	>5		
Note	Ipotesi spessore dell'ultimo elemento in clis: ~ 21 cm				
E5	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	1° piano	Parete perimetrale	~ 60	~ 32	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	1.5	1.5		Intonaco	
	5.5	4.0		Laterizio forato	
	11.0	5.5		Vuoto	
	<i>Fondo foro</i>	16.0	> 5		
Note	Ipotesi spessore dell'ultimo elemento in clis: ~ 21 cm				
E6	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	2° piano	Parete perimetrale	~ 25	~ 25	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	2.0	2.0		Intonaco	
	6.0	4.0		Laterizio forato	
	9.0	3.0		Vuoto	
	<i>Fondo foro</i>	14.0	> 5		
Note	Ipotesi spessore dell'ultimo elemento in clis: ~ 15 cm				
E7	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	3° piano	Parete perimetrale	~ 25	~ 25	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	2.0	2.0		Intonaco	
	6.0	4.0		Laterizio forato	
	9.0	3.0		Vuoto	
	<i>Fondo foro</i>	14.0	> 5		
Note	Ipotesi spessore dell'ultimo elemento in clis: ~ 15 cm				

E8	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	4° piano	Parete perimetrale	~ 100	~ 52	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	1.0	1.0		Intonaco	
	9.0	8.0		Laterizio forato	
	31.5	22.5		Vuoto	
	Fondo foro 36.5	> 5		Cls	
Note	Ipotesi spessore dell'ultimo elemento in cls: ~ 21 cm. Spessore totale ipotizzato: ~52 cm				
E9	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	4° piano	Parete perimetrale	~ 180	~52 cm	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	3.0	3.0		Intonaco	
	7.0	4.0		Laterizio forato	
	13.5	6.5		Vuoto	
	21.5	8.0		Laterizio forato	
	31.0	9.5		Vuoto	
	Fondo foro 36.0	>5		Cls	
Note	Spessore totale ipotizzato: ~52 cm				
E10	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	4° piano	Parete perimetrale	~ 100	~ 35	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	1.0	1.0		Piastrelle	
	2.5	1.5		Colla/intonaco	
	12.5	10.0		Laterizio forato	
	17.5	5.0		Vuoto	
	27.5	10.0		Laterizio forato	
	29.5	2.0		Vuoto	
	33.5	4.0		Laterizio forato	
	35.0	1.5		Intonaco	
Note	Foro passante				
E11	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	3° piano	Parete perimetrale	~ 130	~ 18	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	1.0	1.0		Piastrelle	
	2.5	1.5		Colla/intonaco	
	Fondo foro 12.5	>10		Laterizio forato	
Note	Ipotesi dimensione ultimo elemento forato: 14 cm. Seguito da strato di intonaco.				

E12	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	4° piano	Parete interna	~ 170	22.5	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	2.0	2.0		Intonaco	
	10.0	8.0		Laterizio forato	
	13.0	3.0		Vuoto	
	21.0	8.0		Laterizio forato	
	22.5	1.5		Intonaco	
Note					
E13	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	4° piano	Parete perimetrale	~ 40	/	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	3.0	3.0		Intonaco	
	<i>Fondo foro</i>	7.0	>4		
Note	Eseguita allo scopo di verificare presenza cls.				
E14	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	Attico	Parete perimetrale	~ 100	~ 22	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	1.0	1.0		Intonaco	
	9.0	8.0		Laterizio forato	
	12.0	3.0		Vuoto	
	<i>Fondo foro</i>	18.0	>6		
Note	Ipotesi dimensione ultimo elemento in laterizio forato: 8 cm. A seguire strato intonaco.				
E15	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	Attico	Parete interna	~ 120	/	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	0.5	0.5		Intonaco	
	8.5	8.0		Laterizio forato	
	10.5	2.0		Vuoto	
	<i>Fondo foro</i>	16.5	>6		
Note	Ipotesi dimensione ultimo elemento in laterizio forato: 8 cm. A seguire strato intonaco.				

E16	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	1° piano	Parete perimetrale	/	~ 33	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	2.0	2.0		Intonaco	
	10.0	8.0		Laterizio forato	
	12.0	2.0		Vuoto	
	Fondo foro	24.0	>12		
Note	Spessore totale ipotizzato: circa 33 cm				
E17	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	1° piano	Parete perimetrale	/	~ 35	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	2.0	2.0		Intonaco	
	Fondo foro	6.0	>4		
Note	Ipotesi: 16 laterizio+10 vuoto + 6/8 laterizio + intonaco. Non è stato verificato perché nel vuoto scorre l'infisso.				
E18	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	Attico	Parete perimetrale	/	/	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	1.0	1.0		Intonaco	
	Fondo foro	5.0	>4		
E19	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	Piano Terra	Parete perimetrale	~ 130	~ 37	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	4.0	4.0		Piastrelle	
	5.5	1.5		Colla/intonaco	
	18.5	13.0		Mattone pieno	
	28.5	10.0		Vuoto	
	Fondo foro	32.0	>3.5		
Note	Ipotesi dimensione ultimo laterizio forato: 8cm.				
E20	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	Piano Terra	Parete perimetrale	~ 140	~ 35	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	4.0	4.0		Piastrelle	
	5.5	1.5		Colla/intonaco	
	Fondo foro	24.0	>18.5		

E21	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	1° piano	Parete interna	~ 160	~ 23	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	2.0	2.0		Intonaco	
	10.0	8.0		Laterizio forato	
	13.0	3.0		Vuoto	
	<i>Fondo foro</i>	16.0	>3		
Note	Ipotesi dimensione ultimo elemento in laterizio forato: 8 cm. A seguire strato intonaco.				
E22	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	1° piano	Parete interna	~ 130	~ 27	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	1.5	1.5		Intonaco	
	9.5	8.0		Laterizio forato	
	18.5	9.0		Vuoto	
	<i>Fondo foro</i>	20.5	>2		
Note	Ipotesi dimensione ultimo elemento in laterizio forato: 8 cm. A seguire strato intonaco.				
E23	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	1° piano	Parete interna	~ 130	~ 27	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	1.5	1.5		Intonaco	
	9.5	8.0		Laterizio forato	
	18.5	9.0		Vuoto	
	<i>Fondo foro</i>	20.5	>2		
Note	Ipotesi dimensione ultimo elemento in laterizio forato: 8 cm. A seguire strato intonaco.				
E24	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	4° piano	Parete perimetrale	/	/	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	1.0	1.0		Intonaco	
	<i>Fondo foro</i>	5.0	>4		
Note	Eseguita per verificare la presenza di clis.				

E25	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	4° piano	Parete interna	~ 140	~ 25	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	1.5	1.5		Intonaco	
	9.5	8.0		Laterizio forato	
	15.0	5.5		Vuoto	
	Fondo foro	17.0	>2		
Note	Ipotesi dimensione ultimo elemento in laterizio forato: 8 cm. A seguire strato intonaco.				
E26	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	4° piano	Parete interna	~ 140	~ 25	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	1.5	1.5		Intonaco	
	9.5	8.0		Laterizio forato	
	14.0	4.5		Vuoto	
	Fondo foro	16.0	>2		
Note	Ipotesi dimensione ultimo elemento in laterizio forato: 8 cm. A seguire strato intonaco.				
E27	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	4° piano	Parete interna	~ 160	~ 23	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	2.0	2.0		Intonaco	
	10.0	8.0		Laterizio forato	
	14.0	4.0		Vuoto	
	Fondo foro	16.0	>2		
Note	Ipotesi dimensione ultimo elemento in laterizio forato: 8 cm. A seguire strato intonaco.				
E28	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	Attico	Solaio di soffitto	/	~ 22	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	1.0	1.0		Intonaco	
	13.0	12.0		Pignatta	
	17.0	4.0		Getto/massetto	
	Fondo foro	16.0	>2		
Note	Ipotesi dimensione ultimo elemento in laterizio forato: 8 cm. A seguire strato intonaco.				

E29	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	3° piano	Parete interna	~ 160	~ 23	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	1.5	1.5		Intonaco	
	9.5	8.0		Laterizio forato	
	13.5	4.0		Vuoto	
	<i>Fondo foro</i>	15.5	>2		
Note	Ipotesi dimensione ultimo elemento in laterizio forato: 8 cm. A seguire strato intonaco.				
E30	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	3° piano	Parete interna	~ 140	~ 25	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	1.5	1.5		Intonaco	
	9.5	8.0		Laterizio forato	
	15.0	5.5		Vuoto	
	<i>Fondo foro</i>	17.0	>2		
Note	Ipotesi dimensione ultimo elemento in laterizio forato: 8 cm. A seguire strato intonaco.				
E31	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	3° piano	Parete interna	~ 140	~ 25	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	1.0	1.0		Intonaco	
	9.0	8.0		Laterizio forato	
	14.0	5.0		Vuoto	
	<i>Fondo foro</i>	16.0	>2		
Note	Ipotesi dimensione ultimo elemento in laterizio forato: 8 cm. A seguire strato intonaco.				
E32	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	2° piano	Parete interna	~ 140	~ 23	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	1.5	1.5		Intonaco	
	9.5	8.0		Laterizio forato	
	13.5	4.0		Vuoto	
	<i>Fondo foro</i>	15.5	>2		
Note	Ipotesi dimensione ultimo elemento in laterizio forato: 8 cm. A seguire strato intonaco.				

E33	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]		
	2° piano	Parete interna	~ 140	~ 25		
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione			
	1.5	1.5		Intonaco		
	9.5	8.0		Laterizio forato		
	14.5	5.0		Vuoto		
<i>Fondo foro</i>	16.5	>2		Laterizio forato		
Note	Ipotesi dimensione ultimo elemento in laterizio forato: 8 cm. A seguire strato intonaco.					
E34	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]		
	2° piano	Parete interna	~ 140	~ 25		
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione			
	1.5	1.5		Intonaco		
	9.5	8.0		Laterizio forato		
	14.0	4.5		Vuoto		
<i>Fondo foro</i>	16.0	>2		Laterizio forato		
Note	Ipotesi dimensione ultimo elemento in laterizio forato: 8 cm. A seguire strato intonaco.					
E35	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]		
	3° piano	Parete interna	~ 140	~ 28		
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione			
	1.5	1.5		Intonaco		
	9.5	8.0		Laterizio forato		
	18.5	9.0		Vuoto		
<i>Fondo foro</i>	20.5	>2		Laterizio forato		
Note	Ipotesi dimensione ultimo elemento in laterizio forato: 8 cm. A seguire strato intonaco.					
E36	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]		
	2° piano	Parete interna	~ 140	~ 28		
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione			
	1.5	1.5		Intonaco		
	9.5	8.0		Laterizio forato		
	18.5	9.0		Vuoto		
<i>Fondo foro</i>	20.5	>2		Laterizio forato		
Note	Ipotesi dimensione ultimo elemento in laterizio forato: 8 cm. A seguire strato intonaco.					

E37	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	1° piano	Parete interna	~ 140	~ 28	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	1.0	1.0		Intonaco	
	9.0	8.0		Laterizio forato	
	18.0	9.0		Vuoto	
	Fondo foro 20.0	>2		Laterizio forato	
Note	Ipotesi dimensione ultimo elemento in laterizio forato: 8 cm. A seguire strato intonaco.				
E38	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	1° piano	Solaio di calpestio	~ 140	~ 57	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	1.0	1.0		Pavimentazione	
	12.0	11.0		Getto/massetto	
	28.0	16.0		1°laterizio forato	
	48.0	20.0		2°laterizio forato	
Fondo foro 57.0	9.0		Cls		
Note	Si ipotizza che gli elementi in laterizio forato siano pignatte.				
E39	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	2° piano	Solaio di calpestio	/	~31	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	1.0	1.0		Pavimentazione	
	10.0	9.0		Getto/massetto	
	30.0	20.0		Pignatta	
	31.0	1.0		Intonaco	
Note					
E40	Ubicazione	Elemento	H foro da terra [cm]	Spessore elemento [cm]	
	1° piano	Solaio di calpestio	/	~ 30	
Stratigrafia	Quota progressiva [cm]	Spess. strato [cm]	Descrizione		
	1.0	1.0		Pavimentazione	
	9.0	8.0		Getto/massetto	
	25.0	16.0		Pignatta	
	31.0	6.0		Cls	
Note					

6.4 PROVE DI LABORATORIO

Le prove a compressione sui campioni di cls estratti sono state svolte presso il Laboratorio Prove Materiali "G. Antinori" di Camerino (Aut. Min. n. 40266 del 11/12/1995 e rinnovo n. 711 del 0311/2015).

6.4.1 Prova di compressione su provini cilindrici di calcestruzzo

6.4.1.1 Risultati

ID Provino	Dimensioni			Area Sezione [mm ²]	Massa Volumica [kg/m ³]	Carico di rottura		Tipo di rottura
	D [mm]	H [mm]	H/D			Totale [kN]	f _c [N/mm ²]	
C1	99	99	1.00	7694	2311	127.5	16.6	Soddisf.
C2	99	99	1.00	7694	2313	133.3	17.3	Soddisf.
C3	99	99	1.00	7694	2301	126.7	16.5	Soddisf.
C4	99	99	1.00	7694	2305	124.6	16.2	Soddisf.
C5	99	99	1.00	7694	2152	119.8	15.6	Soddisf.
C6	99	99	1.00	7694	2242	128.3	16.7	Soddisf.
C7	99	99	1.00	7694	2396	148.3	19.3	Soddisf.
C8	99	99	1.00	7694	2261	162.0	21.1	Soddisf.
C9	99	99	1.00	7694	2216	130.0	16.9	Soddisf.
C10	99	99	1.00	7694	2342	127.8	16.6	Soddisf.
C11	99	99	1.00	7694	2287	118.3	15.4	Soddisf.
C12	99	99	1.00	7694	2202	156.4	20.3	Soddisf.
C13	99	99	1.00	7694	2232	151.5	19.7	Soddisf.
C14	99	99	1.00	7694	1640	147.6	19.2	Soddisf.
C15	99	99	1.00	7694	2177	122.7	15.9	Soddisf.

6.4.1.2 Documentazione fotografica



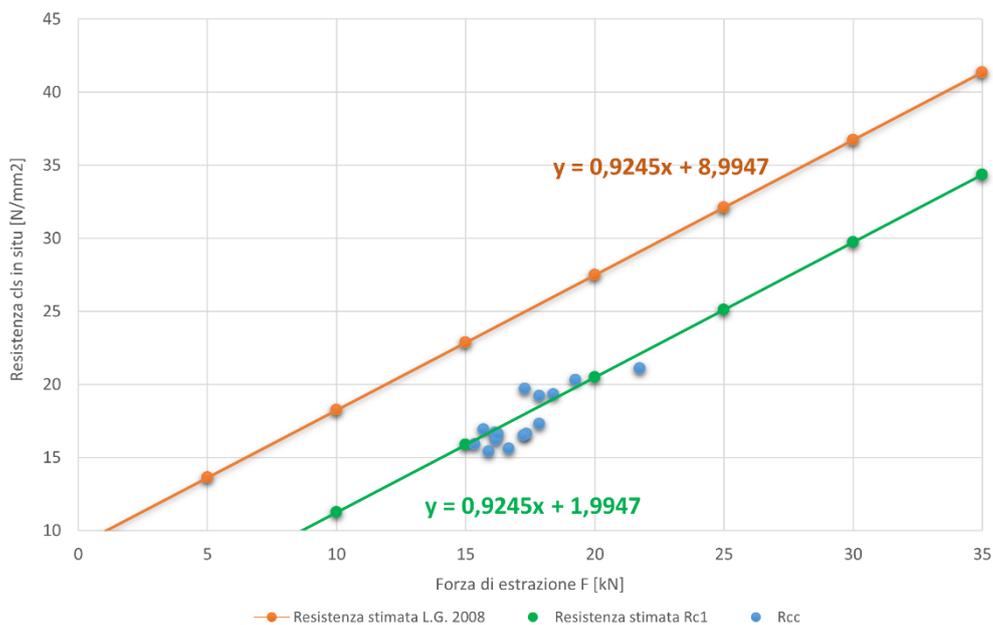
6.5 DIAGNOSI

6.5.1 Interpretazione dei risultati

La campagna di indagini svolta ha permesso di individuare per ognuna delle prove eseguite dei parametri che, interpretati seguendo quanto riportato nelle rispettive normative, contribuiscono alla formulazione della diagnosi dei fenomeni di degrado riscontrati sulla struttura oggetto di studio. In particolare, verranno di seguito esposte le interpretazioni relative alle prove di estrazione Pull-out e ai metodi colorimetrici svolte allo scopo di confermare l'ipotesi di diagnosi formulata durante l'esame visivo

6.5.1.1 Prove di estrazione pull-out

Tipicamente, la prova di pull-out è riconosciuta come una delle tecniche più affidabili per la stima della resistenza del calcestruzzo in opera, sia in costruzioni nuove che esistenti. A questo scopo, la forza di estrazione dedotta dalla prova può essere empiricamente correlata alla resistenza in sito del calcestruzzo, determinata in conformità alla UNI EN 12504-1:2009. A tal proposito è necessario osservare che le curve di correlazione *forza di estrazione-resistenza del calcestruzzo* non sono applicabili in maniera diretta nel caso di correlazioni di prove su strutture esistenti in quanto tendono a sovrastimare la resistenza correlata rispetto al valore di resistenza reale della carota sottoposta a prova di compressione. Per tale motivo la correlazione tra *forza di estrazione e resistenza a compressione* è stata ricavata analiticamente con regressioni non-lineari (di tipo potenza) a partire dalla correlazione delle “Linee Guida per la valutazione delle caratteristiche del cls in opera” pubblicate dal C.S.L.L.P. e ridotta sino ai valori di resistenza in opera calcolati a partire dalla resistenza di ogni carota.



ID prova	Forza di estrazione [kN]	Resistenza stimata L.G. Rc L.G. [Mpa]	Resistenza Corr 1. Rc 1 [Mpa]	Rc Carotaggio Rcc [Mpa]
P01-A	15,9	23,6	16,6	16,60
P01-C	18,9	26,4	19,4	16,60
P02-A	20,4	27,8	20,8	17,30
P02-C	15,4	23,2	16,2	17,30
P03-A	18,2	25,8	18,8	16,50
P03-C	16,3	24,1	17,1	16,50
P04-A	16,4	24,2	17,2	16,20
P04-C	16,0	23,7	16,7	16,20
P05-A	17,8	25,5	18,5	15,60
P05-C	15,6	23,4	16,4	15,60
P06-A	16,6	24,3	17,3	16,70
P06-C	15,7	23,5	16,5	16,70
P07	18,4	26,0	19,0	19,30
P08	21,8	29,1	22,1	21,10
P09	15,7	23,5	16,5	16,90
P010	16,3	24,0	17,0	16,60
P011	15,9	23,7	16,7	15,40
P012	19,3	26,8	19,8	20,30
P013	17,3	25,0	18,0	19,70
P014	17,9	25,5	18,5	19,20
P015	15,4	23,2	16,2	15,90
P016-A	21,0	28,4	21,4	
P016-C	20,4	27,9	20,9	
P016-D	21,2	28,6	21,6	
P017-A	17,7	25,4	18,4	
P017-C	19,7	27,2	20,2	
P017-D	20,3	27,7	20,7	
P018-A	21,7	29,0	22,0	
P018-C	21,8	29,1	22,1	
P018-D	20,1	27,5	20,5	
P019-A	18,6	26,1	19,1	
P019-C	20,1	27,6	20,6	
P019-D	19,9	27,3	20,3	
P020-A	18,6	26,2	19,2	
P020-C	17,6	25,3	18,3	
P020-D	19,9	27,4	20,4	
P021	16,6	24,3	17,3	
P022	23,9	31,1	24,1	
P023	19,7	27,2	20,2	
P024	18,9	26,5	19,5	
P025	19,7	27,2	20,2	
P026	17,4	25,0	18,0	
P027	18,5	26,1	19,1	
P028	16,6	24,3	17,3	
P029	24,1	31,3	24,3	
P030	17,2	24,9	17,9	
P031	18,2	25,8	18,8	

6.5.1.2 Rilievo colorimetrico del fronte di carbonatazione

Il rilievo del profilo di carbonatazione ottenuto utilizzando due diversi indicatori di pH ha evidenziato una condizione di carbonatazione che interessa lo strato superficiale degli elementi in cls e che comprende l'intero spessore del copriferro. Solo in pochi casi,

infatti, l'attacco carbonatico ha raggiunto o superato lo spessore critico del copriferro (C20/C20-sub1, C21/C21-sub1, C23/C23-sub1) ma nella media si attesta intorno ai 20 mm di profondità.

Questo risultato è stato confermato anche dal confronto che ha permesso di osservare il comportamento della fenolftaleina, agente ritenuto cancerogeno, e della timolftaleina dopo averle nebulizzate sulle facce verticali di su-provini ottenuti da carote prelevate in situ.

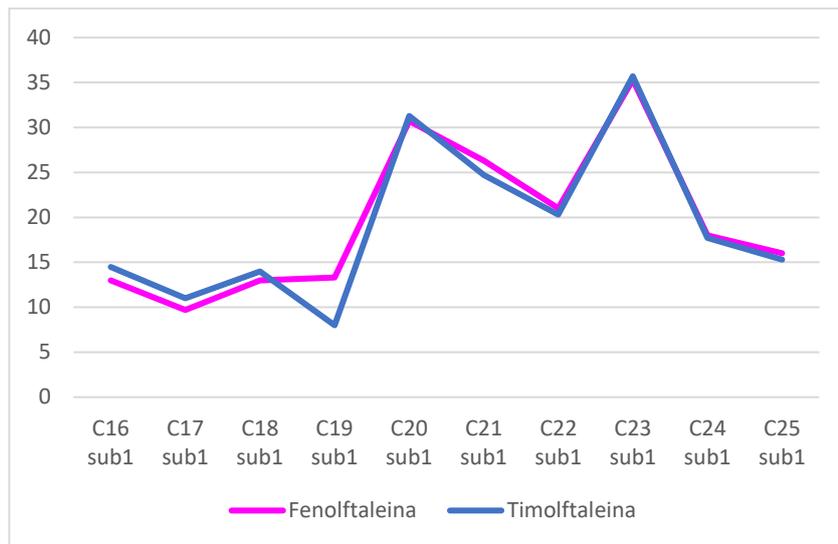


Grafico 1 - Confronto tra i due indicatori di pH

Come si può notare dal grafico, le profondità medie del fronte di carbonatazione per 9 sub-provini su 10, hanno valori simili e quindi paragonabili. Solo in un caso il valore rilevato con l'indicatore alla timolftaleina si discosta del 30% rispetto a quello rilevato mediante la fenolftaleina.

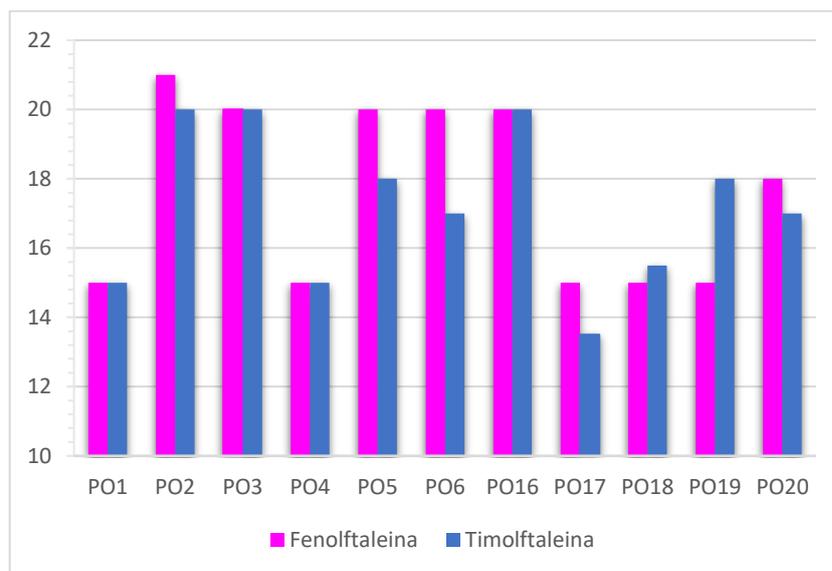


Grafico 2 - Confronto dei risultati di carbonatazione mediante i due indicatori di pH sulle superfici pull-out

Inoltre, ponendo sullo stesso grafico le profondità di carbonatazione delle superfici di rottura dei Pull-out misurate con entrambe gli indicatori con i profili colorimetrici delle carote prelevate negli stessi punti, si nota come i valori di carbonatazione relativi ai Pull-out restano all'interno del range di valori minimo e massimo rilevati sulle carote.

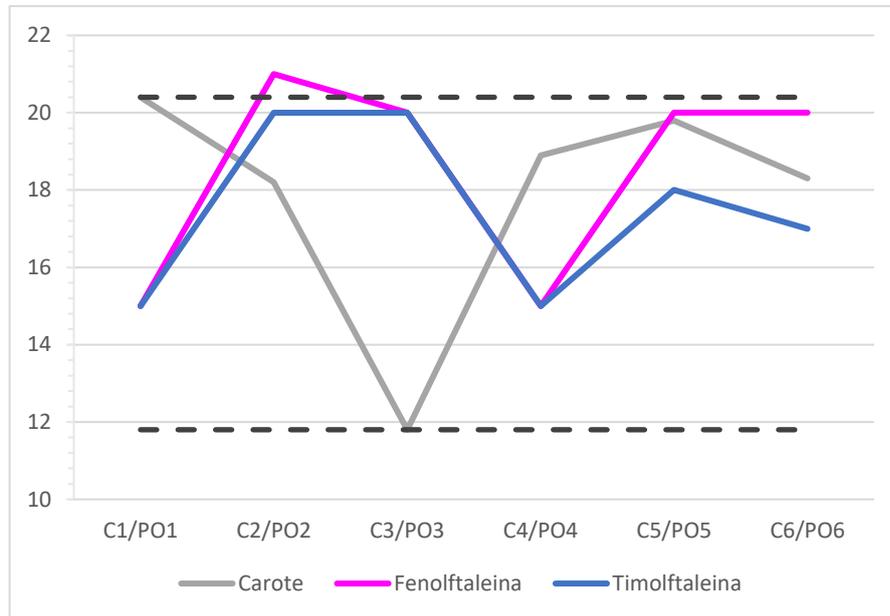


Grafico 3 - Confronto delle profondità di carbonatazione su carote e superfici pull-out

La spiegazione potrebbe derivare dal fatto che la superficie di rottura del Pull-out, essendo più piccola rispetto alla superficie esterna della carota, fornisce una profondità di carbonatazione che rappresenta una piccola parte degli n valori rilevati sulla superficie della carota. È opportuno notare che i campionamenti sono stati effettuati sui pilastri del piano terra e in corrispondenza dei due corpi scala ai vari livelli, elementi non interessati da fenomeni avanzati di degrado come riscontrato ai piani superiori, ed è quindi ragionevole dedurre che nelle zone maggiormente esposte alla profondità di cls alterato sarebbero state più elevate e avrebbero sicuramente oltrepassato lo spessore del copriferro.

6.5.1.3 Rilievo della profondità di penetrazione degli ioni cloruro

L'indagine colorimetrica per il rilievo della profondità di penetrazione degli ioni cloruri ha dimostrato, come supposto nella fase di pre-diagnosi, l'esistenza di un attacco chimico da parte dei cloruri presenti nell'aerosol marino a cui è assoggetta la struttura presa in esame.

L'attacco cloridrico è stato rilevato sui 9 subprovini dei 10 totali prelevati (il provino C24 sub2 è stato scartato per una non conformità di rottura) che, come si evince dal grafico, ha interessato una profondità media di 20,8 mm di calcestruzzo. Se ne deduce che la penetrazione ha interessato nella maggior parte dei casi solo la parte corticale delle

superfici in c.a., infatti solo in 3 sub-provini su 10 è stato rilevato un profilo colorimetrico critico che interessava uno spessore pari al copriferro delle armature.

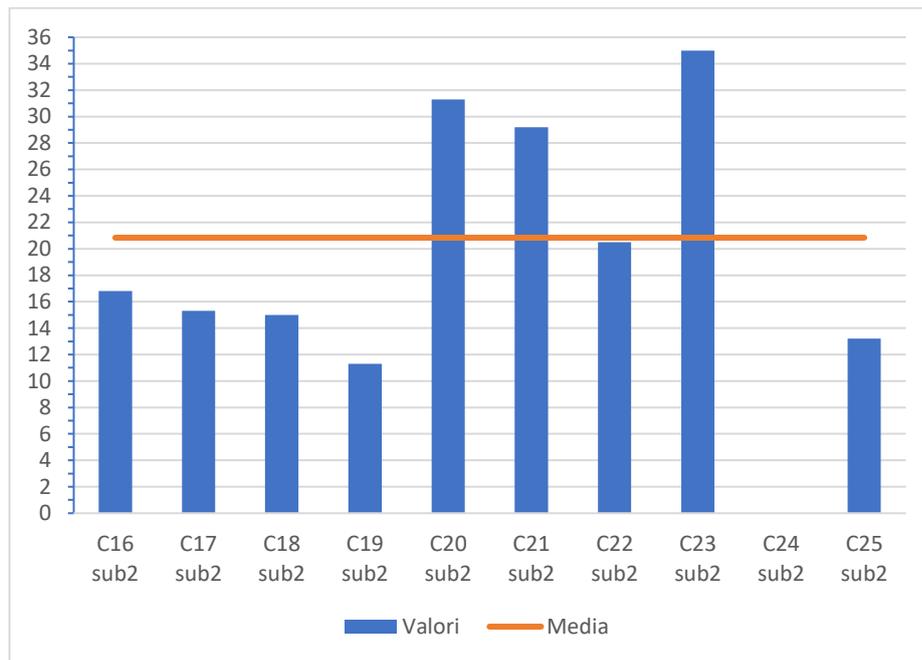


Grafico 4 - Profondità di penetrazione degli ioni cloruro

6.5.2 Individuazione delle cause

In base ai risultati ottenuti in situ e a quanto dedotto nella fase interpretativa dei risultati si è potuto evincere che la struttura è interessata da fenomeni corrosivi in atto delle armature e la conseguente espulsione del copriferro promossi dall'azione aggressiva dell'anidride carbonica presente nell'aria. Il degrado associato alla corrosione dei ferri può essere considerato allo stato attuale un danno che interessa la parte corticale delle armature e pertanto in base a quanto dedotto dai risultati delle indagini, è necessario intervenire con operazioni di ripristino e protezione dei materiali per evitare di accelerare il processo corrosivo delle armature e compromettere la statica dell'edificio.

6.6 PROPOSTA DI INTERVENTI DI RECUPERO

Proporre determinate tipologie di interventi per riparare strutture in calcestruzzo armato è un'attività che richiede personale qualificato e competente, ma in primo luogo richiede delle procedure standard da seguire, in modo tale da avere disciplina nella progettazione e nella realizzazione degli interventi.

La definizione delle varie procedure da seguire e dei prodotti da utilizzare per gli interventi di ripristino e rinforzo dell'edificio è stata eseguita facendo riferimento alla norma UNI EN 1504 "Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture in calcestruzzo – Definizioni, requisiti, controllo di qualità e valutazione della

conformità". Lo scopo principale di questa norma è quello di fornire una base schematica da poter seguire la maggior parte delle volte, col fine di ottimizzare l'intervento di ripristino, evitando così di semplificare troppo il problema che ci si trova davanti.

In particolare, la norma fornisce indicazioni di base per determinare il giusto tipo di intervento da effettuare: in primo luogo devono essere prese in considerazione varie opzioni prima di realizzare qualsiasi intervento, ragionando sulle cause che hanno determinato il degrado e le condizioni in cui andrà a operare.

In funzione della riparazione o della protezione da eseguire e sulla base dei risultati ottenuti dalle analisi condotte sono state proposte le tipologie di prodotti da adottare in collaborazione con l'azienda Mapei.

6.6.1 Preparazione dei supporti

Per procedere agli interventi di rinforzo strutturale sull'edificio in c.a. in generale è preventivamente necessario eseguire la rimozione degli strati di finitura presenti, che possono essere intonaci o pitture. In seguito, è necessario verificare lo stato superficiale dell'elemento in esame.

Se la sezione in c.a. si presenta compatta, solida e con valide caratteristiche meccaniche, il tutto senza presentare eventuali fessurazioni o presenza di sostanze come olii, disarmani, ruggine e quant'altro (ovvero sostanze che potrebbero alterare l'adesione dei rinforzi), allora basterà pulire accuratamente la superficie di calcestruzzo.

Se, invece, l'elemento si presenta ammalorato e le barre d'armatura mostrano fenomeni di ossidazione, si dovrà procedere con un'accurata preparazione del supporto, fondamentale per garantire un buon risultato e la durabilità dell'intervento. Questa lavorazione si divide in tre fasi specifiche:

- 1) Rimozione della zona di calcestruzzo ammalorata, fino a raggiungimento di un supporto stabile e compatto, che dovrà presentare un'adeguata scabrosità di almeno 5 mm;
- 2) Liberazione dalla ruggine delle barre d'armatura;
- 3) Pulizia della superficie, per l'eliminazione di tutte le sostanze estranee.

Le tre fasi appena elencate possono essere svolte seguendo le modalità più idonee al manufatto in esame; si riportano in seguito le procedure più comunemente usate:

- *Irruvidimento*: abrasione della matrice indurita tramite tela smeriglio, con il fine di eliminare i depositi superficiali e irruvidire il sottofondo.
- *Spazzolatura superficiale del conglomerato cementizio* → operazione effettuata per l'eliminazione del lattime di cemento e delle parti incoerenti.

- *Spazzolatura superficiale delle barre d'armatura* → pulizia delle superfici in acciaio.
- *Idroscarifica*: getto d'acqua ad alta pressione, erogato da un macchinario apposito con lo scopo di eliminare eventuali parti distaccate, inquinanti, ruggine, rendendo infine la superficie sufficientemente scabra per l'applicazione di malta da ripristino.
- *Idrolavaggio*: pulizia del sottofondo tramite idropulitrice a pressione, col fine dell'eliminazione delle parti incoerenti e degli inquinanti organici e non.
- *Idrosabbatura*: trattamento per il sottofondo cementizio con inerti e acqua in pressione, al fine di eliminare eventuali inquinanti e parti incoerenti.
- *Sabbatura*: trattamento per l'eliminazione di ruggine dalle armature metalliche e parti incoerenti dalla matrice cementizia, tramite l'ausilio di inerti silicei.
- *Bocciardatura*: martellatura degli elementi in calcestruzzo per realizzare una superficie ruvida.
- *Depolverizzazione*: rimozione delle parti friabili e della polvere tramite aspiratore apposito industriale.

6.6.2 Protezione dei ferri di armatura:

Per assicurare una condizione in cui le parti anodiche delle armature risultino impossibilitate a prendere parte alla reazione di corrosione, possono essere determinate due tipologie di rivestimenti:

- Rivestimenti attivi, ovvero contenenti pigmenti elettrochimici attivi che fungono da inibitori e garantiscono una protezione catodica di tipo locale (il cemento viene considerato un pigmento attivo per via della sua alcalinità);
- Rivestimenti di barriera, ovvero elementi che donano alle armature un'impermeabilizzazione dall'acqua proveniente dalla risalita capillare del conglomerato cementizio.

Per garantire una protezione anticorrosiva alle barre d'armatura e promuovere un'adesione migliorata tra le malte impiegate per il ripristino e il calcestruzzo, viene proposto l'utilizzo del prodotto *Mapefer IK*, del produttore Mapei, ovvero una malta monocomponente a base di leganti cementizi, polimeri e inibitori di corrosione, che deve essere applicata alle barre d'armatura per prevenire la formazione della ruggine.

Questo prodotto, miscelato adeguatamente con acqua, si presenta come una malta molto lavorabile e di facile applicazione, la quale, in seguito al processo di indurimento, risulta essere resistente ad acqua, gas presenti nell'atmosfera e nebbia salina (requisito essenziale per il caso studio in esame).

Prima dell'applicazione della malta *Mapefer IK*, è necessario ripulire le barre d'armatura dalla ruggine (se presente) e in seguito è consigliabile eseguire la sabbiatura di questi ultimi, con lo scopo di riportare le armature a un metallo bianco. Se risultasse impossibile questa fase preparatoria, sarebbe consigliabile eseguire anche esclusivamente una spazzolatura, col fine di rimuovere il più possibile la ruggine.



Figura 68 - Pulizia dei ferri tramite idrosabbiatura

(Fonte: Mapei)

In seguito alla preparazione delle barre, è possibile procedere alla stesura del prodotto: la stesura deve essere effettuata in due mani (preferibilmente entrambe nell'arco di 24 ore), ricoprendo in modo il più possibile omogeneo i ferri. In totale lo spessore di prodotto che si deve ottenere non deve superare i 2 mm. È bene sottolineare che se il prodotto in questione, il *Mapefer IK*, viene a contatto con la matrice cementizia non risulta essere un problema.



Figura 69 - Applicazione della malta Mapefer 1K a barre d'armatura

(Fonte: Mapei)

6.6.3 Sigillatura lesioni

Una volta preparato il supporto e prima di procedere con qualunque tipologia di intervento, se ci si ritrova in presenza di fessure, queste dovranno essere trattate. In primo luogo, si procede andando ad allargarle tramite l'ausilio di un flessibile, successivamente si aspira la parte di macerie e polvere, mentre come ultimo step, per concludere il processo, si va a sigillare la fessura tramite colatura o iniezione del prodotto proposto per questa tipologia di ripristino: *Epojet*.

Questo prodotto specifico permette di ripristinare monoliticamente strutture portanti fessurate, ma se viene posato tramite iniezione a bassa pressione, garantisce anche incollaggio e rinforzo strutturale; infine, il suo ultimo impiego può essere quello di ancoraggio delle armature metalliche ad alta precisione.

Nel caso studio in esame si propone di far uso di questo prodotto per il ripristino degli elementi di facciata in fase di distacco, bensì il suo utilizzo è molto più vasto, in quanto può essere impiegato per la riparazione strutturale di travi, pilastri e solai fessurati, tramite iniezione può fungere da protezione per i cavi post-compressi, ma è spesso utilizzato anche per consolidare edifici o strutture che hanno subito danneggiamenti a seguito di un evento sismico.

Il prodotto *Epojet* si presenta come un adesivo epossidico, che dopo la miscelazione assume la consistenza di un liquido a viscosità limitata, per questo è adatto a iniezioni. Una volta polimerizzato questo diviene impermeabile all'acqua, offrendo ottime proprietà dielettriche ed elevate resistenze meccaniche, garantendo un'adesione ottimale tra acciaio e calcestruzzo.

Prima di procedere con l'applicazione di quest'ultimo bisogna eseguire un'adeguata preparazione del supporto, successivamente si procede con la miscelazione delle due parti

da cui è composto il prodotto e poi questo può essere applicato. L'applicazione avviene per iniezione tramite pompa idonea (se ci trova nel caso di fessurazioni orizzontali, il prodotto viene applicato semplicemente tramite colatura).



Figura 70 -Iniezione del prodotto Epojet in un pilastro lesionato
(Fonte: Mapei)

6.6.4 Ripristino del cls

Il calcestruzzo, nell'edificio caso studio, risulta essere fortemente degradato, soprattutto in facciata, di conseguenza viene proposto un intervento di ripristino per ovviare a questo problema. Per il risanamento del calcestruzzo viene proposto un ripristino tramite l'applicazione di una malta tissotropica a presa normale, la *Mapegrout*, *Ripara Facile*, del produttore Mapei.

Questa malta tissotropica è adatta al ripristino del copriferro, ma anche al ripristino di gronde e frontalini di balcone di strutture in calcestruzzo in ambiente marino (come nel caso studio in esame), per queste motivazioni principalmente lo si promuove come possibile metodo di intervento. Ovviamente risulta essere un prodotto valido anche per il recupero di travi e pilastri e strutture prefabbricate in calcestruzzo armato.

Nello specifico si presenta con una malta premiscelata in polvere, caratterizzata dal fatto di essere monocomponente, fibrorinforzata e composta da cementi ad alta resistenza, aggregati e additivi superfluidificanti. Questa composizione garantisce anche un'elevata resistenza nei confronti di possibili aggressioni solfatiche, motivo per il quale è un prodotto indirizzato a un ripristino di elementi in calcestruzzo in zona marittima.

Per effettuare questa tipologia di ripristino è necessaria una preventiva preparazione del supporto, andando a rimuovere le zone dove si presenta deterioramento e distacco di calcestruzzo e aspirando tutta la superficie da eventuali macerie e polvere. In seguito, si deve bagnare a saturazione tutta la zona sulla quale si deve intervenire, per poi procedere con l'applicazione della malta, la quale nel frattempo è stata miscelata in betoniera con il

giusto rapporto di acqua (la quale rimane lavorabile per circa 60 minuti). Infine, si può procedere con l'applicazione tradizionale a spatola o cazzuola, avendo cura di realizzare spessori massimi di 5 cm, oppure si può procedere tramite un'applicazione a spruzzatura.



Figura 71 - Stesura di Mapegrout Ripara Facile su elemento in calcestruzzo

(Fonte: Mapei)

6.6.5 Rinforzo con FRP

La sicurezza strutturale, ad oggi, è uno degli argomenti più discussi e ingenti risorse vengono impiegate principalmente per il rinforzo strutturale di edifici esistenti. Infatti, la vulnerabilità sismica è un argomento molto importante, soprattutto in seguito agli eventi che hanno colpito il paese negli ultimi decenni. Per queste motivazioni è consigliabile prevedere un rinforzo di tipo sismico, in quanto gran parte delle strutture sono state progettate in anni in cui le norme tecniche non contemplavano adeguatamente le azioni orizzontali. Bensì, prevedere un rinforzo strutturale è consigliato anche nel caso si presenti il degrado dei materiali che costituiscono la struttura, come l'edificio in esame, ovvero il deterioramento del calcestruzzo e delle barre d'armatura, ma anche cambi di destinazione d'uso dei manufatti, incremento dei carichi agenti o cedimento dei terreni.

Principalmente, per l'edificio caso studio, si propone un rinforzo per il placcaggio dei pannelli nei nodi tra travi e pilastri, in modo da determinarne un miglioramento e adeguamento delle prestazioni nel caso la struttura sia soggetta a sollecitazioni dinamiche, di tipo sismico o impulsivo.

Per questa tipologia di rinforzo strutturale viene proposto l'impiego di *MapeWrap C QUADRI-AX System*, un sistema composto da tessuto quadriassiale in fibra di carbonio ad alta resistenza, con elevato modulo elastico e resine epossidiche di impregnazione e incollaggio (FRP).

Gli FRP (Fiber Reinforced Polymers) sono materiali fibrorinforzati a matrice polimerica, dove le fibre (in carbonio, vetro, basalto, aramide) svolgono la funzione di

soportare le sollecitazioni, mentre la matrice trasferisce le sollecitazioni alle fibre. Questo sistema va a sostituire il tradizionale intervento di placcaggio con inserimento di piastre di metallo, le quali sono estremamente pesanti e soggette a corrosione, oltre a necessitare di bullonatura per essere ancorate alla struttura. Il sistema in FRP invece si presenta in fogli di tessuto, che va a eliminare i problemi legati alla corrosione e i problemi legati al peso aggiuntivo, semplificando la messa in opera, riducendo drasticamente i tempi d'intervento e non modifica le dimensioni dell'elemento che deve essere rinforzato.

Questa tipologia di intervento permette alle strutture di migliorare la capacità deformativa globale, intervenendo solo a livello locale, garantendo così ai singoli elementi maggior duttilità, andando a correggere la gerarchia delle resistenze.

Previa applicazione di questo sistema di rinforzo strutturale è necessario preparare il sottofondo, garantendo una superficie che sia resistente dal punto di vista meccanico e che si presenti pulita e asciutta. In seguito, provvedere alla pulitura dei ferri d'armatura da eventuale ruggine (andando a proteggerle come spiegato nel paragrafo 7.6.2) e ripristinare le zone in cui il calcestruzzo si presenta come ammalorato (come mostrato nel paragrafo 7.6.4). Dopo aver effettuato queste operazioni è necessario attendere tre settimane prima di poter procedere alla posa in opera di *MapeWrap C QUADRI-AX System*. È bene puntualizzare come tutti gli elementi che devono essere fasciati con questo sistema FRP devono essere preventivamente smussati negli angoli, garantendo un raggio di curvatura di circa 2 cm (in accordo con la CNR-DT 200 R1/2013).

Una volta eseguita la posa in opera di *MapeWrap C QUADRI-AX System*, a completo indurimento dei sistemi epossidici impiegati, si può eseguire il rivestimento protettivo.

6.6.6 Protezione del cls

Nelle zone dell'edificio in cui non è prevista la posa di un eventuale cappotto termico, dopo il ripristino del calcestruzzo e l'eventuale rinforzo strutturale, si può procedere alla rasatura dell'intera superficie mediante *Planitop 200* del produttore Mapei, ovvero una rasatura cementizia idrofuga monocomponente, caratterizzata da una granulometria fine di colorazione grigia o bianca e a indurimento normale. Questa rasatura cementizia è a base di leganti ad alta resistenza, aggregati, additivi speciali e polimeri sintetici in polvere.

Il prodotto *Planitop 200* miscelato con sola acqua presenta elevate caratteristiche adesive, risulta di semplice applicazione nella stesura con spatola e facilita le operazioni

di finitura con frattazzo metallico. Questa malta può essere applicata in spessore non superiore ai 3 mm per mano e viene consigliata l'applicazione di due mani, con interposta una rete in fibra di vetro *Mapenet 150*.



Figura 72 - Applicazione della seconda mano di *Planitop 200*, con interposta *Mapenet 150*

(Fonte: Mapei)

6.6.7 Pitturazione

Prima di effettuare l'operazione di pitturazione è bene eseguire un ciclo di protezione e finitura con un primer, che va a preparare il fondo delle superfici murali, consigliando come prodotto il *Malech*, di Mapei. Si tratta di un fondo a base di resina acrilica micronizzata in una dispersione acquosa, che applicato sul calcestruzzo, penetra in profondità. Questo prodotto ha due particolari caratteristiche: grazie alla sua formulazione riesce a consolidare la polvere che giace sulle superfici dove viene applicato e, penetrando in profondità, va a rallentare la formazione di efflorescenze.

In seguito all'applicazione del primer si può procedere con la pitturazione, tramite *Elastocolor Pittura*, sempre del produttore Mapei. Questa pittura è monocomponente ed è a base di resine acriliche in una dispersione acquosa, la sua caratteristica principale è che dopo essersi asciugata completamente forma un rivestimento elastico e impermeabile all'acqua e agli agenti aggressivi presenti nell'atmosfera, come CO₂ e SO₂, ma garantisce comunque la permeabilità per il passaggio del vapore. Inoltre, ha un'ottima resistenza all'invecchiamento, ai cicli di gelo-disgelo e ai Sali disgelanti, nonché una bassissima ritenzione dello sporco. Questo prodotto viene applicato con tecniche tradizionali, ovvero con pennelli, rulli o a spruzzo, dove si vedono necessarie almeno due mani applicate a 12/24 ore l'una dall'altra. Durante la vita utile della struttura può essere eseguita la sua manutenzione, in quanto questa pittura è lavabile con acqua e detersivi.

CONCLUSIONI

Fino a non molti anni fa si riteneva che una struttura in cemento armato fosse praticamente inalterabile nel tempo. La pratica quotidiana ha dimostrato che la realtà è ben diversa in quanto molte strutture in calcestruzzo armato del passato hanno manifestato segni di degrado e l'edificio residenziale scelto come oggetto del presente lavoro ne è testimonianza.

Le indagini svolte sull'edificio hanno confermato una serie di criticità già rilevate in fase di sopralluogo e che possono essere eliminate attraverso le comuni tecniche di recupero del calcestruzzo armato.

L'esecuzione dei rilievi unitamente alle verifiche in situ estese ed esaustive hanno permesso di raggiungere, in primo luogo, un livello di conoscenza adeguata in termini di dettagli costruttivi e delle caratteristiche meccaniche dei materiali presenti. Tale conoscenza è un prerequisito essenziale non solo ai fini di un progetto di recupero mirato ma anche e soprattutto per contenere i costi di realizzazione dell'intervento stesso.

In quest'ottica, la campagna diagnostica effettuata ha rappresentato il punto di partenza su cui è stata basata la successiva fase di proposta progettuale di intervento.

Da un punto di vista prettamente strutturale, le prove di laboratorio hanno evidenziato come il calcestruzzo, essendo stato confezionato in un'epoca in cui erano poco conosciuti i concetti di mix design e di curing del getto ed essendo posto in un ambiente aggressivo, presenta caratteristiche meccaniche non conformi alle prescrizioni di progetto minime richieste per strutture poste in ambienti aggressivi.

Volutamente, molte delle prove non distruttive che sono state eseguite sono state effettuate in corrispondenza di punti di prova di indagine invasive per avere un confronto diretto dei risultati. I risultati ottenuti dalle prove colorimetriche hanno dato contezza delle cause della corrosione delle armature e dell'espulsione di copriferro estese su tutto l'edificio.

L'esempio del caso di studio oggetto del presente lavoro di tesi è dimostrazione del fatto che la carenza di manutenzione è un problema che non riguarda solo le opere

pubbliche ma interessa la maggior parte degli edifici privati. La consapevolezza che un materiale non sia eterno deve evidenziare la necessità di costante manutenzione delle opere già esistenti che deve essere basata su una fase di conoscenza approfondita della struttura e dei suoi componenti.

Questo richiede un sapere in più: la conoscenza dei metodi di indagine strumentale e delle tecniche di controllo strutturale che permettono al progettista di acquisire la base di dati indispensabile per potere formulare un'ipotesi di intervento.

È auspicabile in tal senso promuovere il concetto di manutenzione degli edifici finalizzata al loro recupero, un approccio che prevede di avere una visione di tipo sistematico che non si limita solo alla risoluzione del problema visibile o macroscopico ma ha come fine la risoluzione delle cause che portano ai difetti.

BIBLIOGRAFIA

- Binda, L., & Saisi, A. (2001). Il ruolo delle indagini nella diagnostica strutturale. *Le mura di Lucca. Dal restauro alla manutenzione programmata*. (p. 136-160). Firenze: Alinea Editore.
- Binda, L., & Saisi, A. (2005). Il ruolo delle indagini nella diagnostica strutturale. In A. Elida, *Le mura di Lucca: dal restauro alla manutenzione programmata* (p. 136-160). Alinea Editrice.
- Bringiotti, M. (2005). *Clcestruzzo: componenti e mix design*. PEI.
- Bufarini, S., D'Aria, V., & Gara, F. (novembre 2019). "Controllo della resistenza del cls in opera mediante procedura innovativa per l'esecuzione standardizzata della prova di estrazione pull-out con tasselli post inseriti". *Atti del Congresso Nazionale dell'Associazione MASTER*, (p. 30-44). Parma.
- Bufarini, S., D'Aria, V., & Giacchetti Roberto. (2010). *Il controllo strutturale degli edifici in cemento armato e muratura*. EPC.
- Buoso, A., & Coppola, L. (2019). *Il restauro dell'architettura moderna in cemento armato*. Hoepli.
- Buoso, A., Pagazzi, G., & Coppola, L. (2009). Iter progettuale ed esecutivo - I passaggi necessari per garantire la durabilità e la sicurezza delle strutture in c.a. *GB News n.30*.
- Calabretta, E., Costa Laia, R., Gramellini, C., Peirone, E., Spinelli, G., Laimberti, A., & Angelosante, A. (Marzo 2018). *Sostanze ozono lesive e/o cancerogene in uso nei laboratori SNPA. Valutazione di alternative compatibili dal punto di vista ambientale e della salute umana nelle procedure di misura*.
- Colleparidi, M. (1981). L'azione dell'acqua del mare sul calcestruzzo armato. *Giornate A.I.C.A.P.* , (p. 251-272). Ravenna.
- Colleparidi, M. (1992). Durabilità del calcestruzzo: teoria, pratica e prescrizioni di capitolato. Parte I: cause di degrado di tipo chimico. *L'industria Italiana del Cemento n.11*, 707-726.
- Colleparidi, M. (2003). *Il nuovo calcestruzzo*. Tintoretto.

- Colleparidi, M., Borsoi, A., Colleparidi, S., Simonelli, F., & Troli, R. (2005). Self-Concrete (3SC): la prossima sfida. *Enco Journal*.
- Colleparidi, M., Coppola, L., & Pistolesi, C. (1993). Materiali e tecnologie per il restauro delle opere in calcestruzzo. *Atti del Convegno di Studi*. Bressanone: Libreria Progetto Editore Padova.
- Colleparidi, M., Fratesi, R., Moriconi, G., Branca, C., & Simncini, S. (1989). L'influenza della carbonatazione sulla corrosione dei ferri nel calcestruzzo armato. *Giornate AICAP'89*. Napoli.
- Colleparidi, M., Marcialis, A., & Turriziani, R. (1970). La cinetica di penetrazione degli ioni cloruro nel calcestruzzo. *Il cemento n.4*, 157-164.
- Coppola, L. (199-209). Durabilità del calcestruzzo: teoria, pratica e prescrizioni di capitolato. Parte II: Cause di degrado di tipo fisico e meccanico. *L'Industria Italiana del Cemento n.675*, 1993.
- Coppola, L. (1993). La Diagnosi del Degrado delle Strutture in Calcestruzzo. *L'industria italiana del Cemento n. 681*, 657-666.
- Coppola, L. (2000). La durabilità delle opere in calcestruzzo in accordo alle normative europee. *Enco Srl*.
- Costa, A., & Appleton, J. (1999). Chloride penetration into concrete in marine environment—Part I: Main parameters affecting chloride penetration. *Materials and Structures 32*.
- D'Amato, M., Laterza, M., & Gigliotti, R. (2007). Indagini distruttive e non distruttive su edifici in ca esistenti secondo l'OPCM 3274/3431: evidenze sperimentali e significatività dei risultati. *12th Italian Conference on Earthquake Engineering*. Pisa.
- Di Paola, F., Di Natale, E., Seidita, M., & Urso, R. (2006). Il materiale calcestruzzo armato dei primi del '900 tecnologia e durabilità. *8° Convegno Nazionale AIMAT*. Palermo.
- <http://masteritalia.org/joomla/index.php/master-magazine-2>. (2022, Giugno). Tratto da MA.S.TE.R.
- <https://diagnosticastrutturale.it/>. (2022, Giugno). Tratto da Cimento S.r.l. Diagnostica Strutturale.
- <https://www.classedil.it/>. (2022, Giugno). Tratto da Classedil.
- <https://www.ingenio-web.it/archivio/magazine>. (2022, Giugno). Tratto da Ingenio.

- <https://www.mapei.com/it/it/prodotti-e-soluzioni/prodotti>. (2022, Giugno). Tratto da Mapei.
- Lorenzi, S., Fontana, F., Pellegrini, S., Pastore, T., & Cabrini, M. (2015).] M. Cabrini, F. Fontana, S. Lorenzi, T. Pastore, S. Pellegrini: “Effect of Organic Inhibitors on Chloride Corrosion of Steel Rebars in Alkaline Pore Solution”. J. Chem. 2015 (2015). *Journal of Chemistry*.
- Massidda, L. (s.d.). Analisi delle cause di degrado del calcestruzzo e delle opere in calcestruzzo armato. *inFORMAZIONE n.103*, 5-10.
- Olazabel, W., & Traversa, L. (1977). *FIP Notes 70*, p. 13.
- Pedefferri, P., & Bertolini, L. (2000). *La durabilità del calcestruzzo armato*. Milano: McGraw Hill.
- Pedefferri, P., & Bertolini, L. (2003). *La corrosione nel calcestruzzo e negli ambienti naturali*. Milano: McGraw-Hill.
- Pigni, I. (s.d.). Il calcestruzzo facciavista. *inConcreto n.24*.
- Pucinotti, R. (2006). *Patologia e diagnostica del cemento armato*. Dario Flaccovio.
- Pucinotti, R. (2020). *Patologia, Diagnostica, Indagini Strutturali*. Dario Flaccovio.
- Scienza e Tecnologia del calcestruzzo*. (s.d.). Milano: Hoepli.
- Shackelford, J. (2009). *Scienza e ingegneria dei materiali 7/Ed*. Pearson Paravia Bruno Mondadori.