

# **POLITECNICO DI MILANO**

VI Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Sistemi Edilizi

Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica

“Giulio Natta”



## **IL SITO ARCHEOLOGICO DI NORA A PULA (CA): CONSERVAZIONE DEGLI ELEMENTI DI SOSTEGNO IN CALCESTRUZZO ARMATO MEDIANTE PROTEZIONE CATODICA**

Relatore: Prof. Luca BERTOLINI

Correlatore: Ing. Elena REDAELLI

Tesi di Laurea di:

Marica MARGIONE 740252

Anno Accademico 2012 – 2013

# Ringraziamenti

Giunta al termine di questa lunga esperienza di lavoro desidero ringraziare il Prof. Luca Bertolini e l'Ing. Elena Redaelli per avermi dato l'opportunità di svolgere la tesi e di poterla sviluppare presso il laboratorio di Materiali Cementizi e Durabilità del Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica "Giulio Natta" del Politecnico di Milano.

Li ringrazio per la disponibilità e la pazienza che hanno dimostrato nei miei confronti in tutti questi mesi, guidandomi costantemente nella stesura della tesi.

Un sentito ringraziamento è rivolto anche all'Ing. Maddalena Carsana e all'Ing. Franco Traisci per avermi aiutato nello sviluppo di questo lavoro.

Infine dedico un pensiero particolare ai miei familiari e al mio ragazzo che sostenendomi e incoraggiandomi hanno reso possibile la chiusura di questo mio lungo cammino universitario.

La tesi è dedicata a tutti coloro che mi sono stati vicini.

# **Indice**

<b>INTRODUZIONE</b>	pag. 1
<b>CAPITOLO 1</b>	
<b>IL SITO ARCHEOLOGICO DI NORA</b>	pag. 3
1.1 Cenni storici	pag. 4
1.2 La scoperta del sito e le attività di ricerca	pag. 4
1.3 Descrizione del sito	pag. 5
<b>CAPITOLO 2</b>	
<b>DEGRADO DELLE OPERE IN CALCESTRUZZO ARMATO</b>	pag. 9
2.1 Degrado del calcestruzzo	pag. 9
2.2 Corrosione delle armature	pag. 10
2.2.1 Meccanismo elettrochimico	pag. 11
2.2.2 Conseguenze della corrosione	pag. 12
2.2.3 Corrosione da carbonatazione	pag. 13
2.2.3.1 Innesco della corrosione	pag. 14
2.2.3.2 Propagazione della corrosione	pag. 16
2.2.4 Corrosione da cloruri	pag. 17
2.2.4.1 Meccanismo dell'attacco corrosivo	pag. 18
2.2.4.2 Penetrazione dei cloruri	pag. 18
2.2.4.3 Tenore critico di cloruri	pag. 19
2.2.4.4 Propagazione della corrosione	pag. 20
<b>CAPITOLO 3</b>	
<b>ISPEZIONE DEGLI ELEMENTI IN CALCESTRUZZO</b>	pag. 21
3.1 Metodologia d'indagine	pag. 21
3.1.1 Osservazione visiva	pag. 21

3.1.2 Tecniche non distruttive	pag. 22
3.1.2.1 Misura dello spessore di copriferro	pag. 22
3.1.2.2 Misure sclerometriche	pag. 23
3.1.2.3 Misura del potenziale	pag. 23
3.1.2.4 Misura della resistività elettrica	pag. 24
3.1.3 Prelievo di campioni e analisi sul calcestruzzo	pag. 25
3.1.3.1 Misura della profondità di carbonatazione	pag. 25
3.2 Risultati delle <i>terme centrali</i> – zona 1	pag. 26
3.2.1 Osservazione visiva	pag. 27
3.2.2 Tecniche non distruttive	pag. 30
3.2.3 Tecniche elettrochimiche	pag. 31
3.2.4 Campioni	pag. 33
3.3 Risultati del <i>teatro</i> – zona 2	pag. 38
3.3.1 Osservazione visiva	pag. 38
3.3.2 Tecniche elettrochimiche	pag. 39
3.3.3 Campioni	pag. 40
3.4 Risultati delle <i>terme a mare “frigidarium”</i> – zona 3	pag. 42
3.4.1 Osservazione visiva	pag. 42
3.4.2 Tecniche elettrochimiche	pag. 43
3.4.3 Campioni	pag. 44
3.5 Risultati delle <i>terme a mare “calidarium”</i> – zona 4	pag. 45
3.5.1 Osservazione visiva	pag. 46
3.5.2 Tecniche elettrochimiche	pag. 46
3.5.3 Campioni	pag. 47

## **CAPITOLO 4**

### **PROVE DI LABORATORIO**

4.1 Metodologia sperimentale	pag. 49
4.1.1 Analisi del contenuto di cloruri	pag. 49

4.1.1.1 Filtrazione della soluzione	pag. 52
4.1.2 Preparazione dei campioni	pag. 52
4.1.2.1 Prove fisiche sui campioni prelevati	pag. 54
4.1.3 Analisi microstrutturali	pag. 55
4.2 Risultati delle analisi dei cloruri	pag. 56
4.3 Risultati delle prove fisiche	pag. 60
4.4 Risultati della diffrazione di raggi X	pag. 62
4.5 Risultati delle osservazioni ESEM	pag. 64
<b>CAPITOLO 5</b>	
<b>DIAGNOSI DELLO STATO DI CONSERVAZIONE</b>	pag. 67
5.1 Terme centrali	pag. 67
5.1.1 Caratterizzazione del calcestruzzo	pag. 67
5.1.2 Stato di corrosione delle armature	pag. 72
5.2 Altre zone	pag. 80
<b>CAPITOLO 6</b>	
<b>PROPOSTA D'INTERVENTO</b>	pag. 82
6.1 Scelta della strategia	pag. 82
6.2 Scelta della tecnica	pag. 84
6.3 Progetto della protezione catodica	pag. 85
6.3.1 Controlli e operazioni preliminari	pag. 87
6.3.2 Dimensionamento del sistema di protezione	pag. 89
6.3.3 Avvio della protezione	pag. 93
6.3.4 Gestione e manutenzione	pag. 94
<b>CONCLUSIONI</b>	pag. 95
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	pag. 97

## **APPENDICI**

**APPENDICE A – RILIEVI GEOMETRICI** pag. 99

**APPENDICE B – PROVE SPERIMENTALI IN SITU** pag.116

**APPENDICE C – INVENTARIO CAMPIONI** pag.141

## **INTRODUZIONE**

Il sito archeologico di Nora, situato sul promontorio di capo di Pula nella Sardegna meridionale, è uno dei siti archeologici che riveste una notevole importanza. Dalle informazioni storiche è emerso che durante la prima campagna di scavo iniziata nel 1952, nella zona archeologica di Nora, sono stati trovati importanti reperti archeologici di epoca punico-romana. Successivamente a partire dal 1990 a tutt'oggi questa zona risulta interessata da importanti attività di scavo, ricerca e recupero dei reperti archeologici da parte della Soprintendenza di Cagliari e Oristano con la collaborazione delle Università di Genova, Pisa, Padova, Viterbo, Venezia e Milano.

Contestualmente alle operazioni di scavo, negli anni 1960/70 sono stati realizzati degli interventi di sostegno in calcestruzzo finalizzate alla conservazione dei reperti archeologici, come la protezione dei numerosi pavimenti in mosaico rinvenuti in questa zona. Ad oggi alcuni di questi elementi in calcestruzzo armato, a causa della corrosione delle barre d'armatura, si trovano in avanzato stato di degrado. Vista l'importanza del sito archeologico e della funzione che devono assolvere queste strutture, la Direzione Generale per i Beni Culturali e Paesaggistici della Sardegna ha promosso un intervento per il recupero degli elementi in calcestruzzo e ha affidato al laboratorio di Materiali Cementizi e Durabilità, presso il Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica "Giulio Natta" del Politecnico di Milano, un incarico per valutare lo stato di conservazione delle parti in calcestruzzo e proporre eventuali interventi.

L'obiettivo di questa tesi, che ha trovato applicazione in questo sito, è stato quello di effettuare una diagnosi sullo stato di conservazione delle strutture in calcestruzzo e di elaborare una proposta d'intervento al fine di preservare le strutture in calcestruzzo armato particolarmente danneggiate.

Durante il mese di settembre 2011 sono stati effettuati sopralluoghi finalizzati ad osservare e documentare il degrado delle parti in calcestruzzo e calcestruzzo armato, ed effettuare diverse prove non distruttive. Inoltre sono stati prelevati dei campioni sui quali sono state effettuate analisi sia in situ che in laboratorio per valutare le caratteristiche del calcestruzzo ed evidenziare le cause del degrado. In seguito è stata elaborata una proposta d'intervento per il recupero delle strutture in calcestruzzo armato danneggiate dalla corrosione.

Nel primo capitolo si descrivono le zone del sito archeologico che sono state oggetto di studio. Nel secondo capitolo si analizza il degrado delle strutture in calcestruzzo armato, analizzando i processi di corrosione causati dalla carbonatazione e dai cloruri. Nel terzo e

quarto capitolo si riportano i risultati ottenuti dalle prove effettuate rispettivamente in situ e in laboratorio. Nel quinto capitolo si analizzano i risultati e si effettua la diagnosi dello stato di conservazione delle strutture in calcestruzzo; infine nel sesto capitolo si elabora una proposta d'intervento finalizzata alla conservazione delle strutture in calcestruzzo armato, basata sull'applicazione della tecnica elettrochimica della protezione catodica.



## **CAPITOLO 1**

### **IL SITO ARCHEOLOGICO DI NORA**

Il sito archeologico di Nora è situato sul promontorio di capo di Pula nella Sardegna meridionale. Questa di lingua di terra è separata dall'entroterra tramite un istmo che nel punto più stretto presenta una larghezza di soli ottanta metri. Attraversato questo stretto il promontorio si estende formando due punte: una a sud denominata Punta 'e su coloru (Punta dei Serpenti) e una ad est chiamata Punta di Coltellazzo posta di fronte all'omonima isoletta. Dalla conformazione geografica si evidenzia una forma quasi triangolare con la base rivolta verso il mare che misura all'incirca 650 metri ed un'altezza di 500 metri misurata fino al restringimento dell'istmo (figura 1.1) [1].



Figura 1.1: Vista aerea del sito archeologico di Nora.

## 1.1 CENNI STORICI

Le informazioni principali sulla storia di Nora come centro urbano si ricavano dalla documentazione archeologica, poiché le fonti scritte ed epigrafiche sono molto scarse. Dalla combinazione di questi documenti si definiscono tre periodi caratteristici che hanno interessato questa città, dalla sua prima occupazione fino al suo abbandono: il periodo nuragico caratterizzato da strutture megalitiche circolari realizzate sovrapponendo grossi macigni senza materiale legante; quello punico nel quale l'architettura si componeva di elementi rettilinei, realizzati utilizzando mattoni di fango e paglia essiccati, che poggiavano su uno zoccolo di pietrame legato con malta di fango; ed infine il periodo romano dove si riscontra una tecnica costruttiva migliore con l'impiego di malta con pozzolana o con frammenti rossi di mattone.

In origine il sito era abitato da genti nuragiche come dimostra il ritrovamento di alcuni conci a T nelle fondazioni del “*tempio di Tanit*” e di alcuni resti ceramici della stessa fase culturale rinvenuti sulla Punta di Coltellazzo. La presenza di un pozzo nuragico nei pressi dell'angolo Sud-Est delle *terme a mare* rappresenta la prova più evidente di questo primo insediamento. In seguito ci fu anche una dominazione fenicia databile intorno al IX secolo a.C. documentata dal ritrovamento di numerose anfore. Gli edifici che si riconducono al periodo punico riguardano la fondazione del “*tempio di Tanit*”, i resti di alcune fortificazioni sulla Punta di Coltellazzo e di muri a telaio nella zona a mare. Nel periodo della dominazione romana, iniziata nel 238 a.C., a Nora si ebbe un forte sviluppo durante il quale furono costruite le *grandi terme* con frigidario, tepidario e calidario; il *teatro*; le *terme a mare*; il foro; i due templi ed una cloaca conservata in perfette condizioni. Inoltre sullo strato punico i Romani realizzarono una rete di strade lastricate, munite di argini per l'acqua piovana, sotto le quali venne costruita una rete fognaria con muri, pavimentazione e coperture in laterizi. In seguito fra il 456 e il 466 ci fu il rapido declino di Nora causato dall'abbandono del mare ai pirati e dall'invasione dei Vandali [1-2].

## 1.2 LA SCOPERTA DEL SITO E LE ATTIVITA' DI RICERCA

Fino al 1952 la città di Nora rimase sommersa e di essa si potevano notare solo alcuni ruderi monumentali, che nell'Ottocento furono identificati da alcuni viaggiatori come i resti dell'acquedotto, del *teatro* su cui si contavano nove o dieci filari di gradini e quelli di un edificio termale individuati nelle *terme a mare*.

La decisione di iniziare una campagna di scavo, intrapresa dall'allora Soprintendente alle Antichità della Sardegna Prof. Gennaro Pesce, avvenne casualmente nel 1952 quando l'E.S.I.T. (Ente Sardo Industrie Turistiche), per preparare la posa del palcoscenico per la rappresentazione di un dramma dello scrittore Marcello Serra, eseguì uno sterro che mise in luce delle strutture antiche. Gli scavi, finanziati dalla regione, continuarono fino al 1960 mettendo in luce più di tre ettari di rovine. Contestualmente allo scavo il Prof. Gennaro Pesce pose l'attenzione alla conservazione delle strutture rinvenute con la realizzazione di tettoie di protezione e interventi di consolidamento degli edifici costruendo strutture in calcestruzzo armato di sostegno o completamento.

In seguito, tra il 1977 e il 1979, grazie all'interesse del Prof. Carlo Tronchetti la Soprintendenza riprende l'attività nel sito con lo scavo delle *terme a mare*.

Dal 1990 le Università di Padova, Genova, Pisa, Viterbo, Venezia e in seguito Milano con la collaborazione della Soprintendenza per i Beni Archeologici di Cagliari e Oristano sono impegnate nelle diverse attività di ricerca, di scavo, di studio dei reperti e di ricognizione del territorio [1-3]. Nel 2011, inoltre, la Direzione Generale per i Beni Culturali e Paesaggistici della Sardegna ha affidato al laboratorio di Materiali Cementizi e Durabilità del Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica "Giulio Natta" del Politecnico di Milano, l'incarico di effettuare una valutazione dello stato di conservazione di alcuni elementi in calcestruzzo con lo scopo di proporre dei possibili interventi di restauro. La presente tesi è parte integrante di questo lavoro.

### 1.3 DESCRIZIONE DEL SITO

Nel sito archeologico di Nora sono presenti diversi resti archeologici rinvenuti durante le operazioni di scavo. Qui di seguito vengono riportate le descrizioni delle aree che sono state oggetto di studio per l'elaborazione di questa tesi:

- ✓ Le *terme centrali* costituite da tre elementi fondamentali che caratterizzano le terme romane: il "frigidarium", il "calidarium" e il "tepidarium". L'ambiente del "frigidarium", che assume una forma a "L", è caratterizzato dalla mancanza delle pareti e dalla presenza di un fantastico mosaico sul pavimento che riproduce il moto delle onde, databile verso la seconda metà del III secolo d.C. Dal "frigidarium" si passa al "tepidarium" che presenta due ambienti entrambi riscaldati da un forno e in seguito si accede al "calidarium" riscaldato anch'esso da due forni [2].

In quest'area verso gli anni 1960/70 sono stati condotti degli interventi strutturali di restauro costruendo elementi in calcestruzzo armato con lo scopo di sorreggere un pavimento in mosaico e di proteggerne un altro posto al di sotto dello stesso [3]. A distanza di circa cinquant'anni questi elementi presentano uno stato di degrado avanzato, come dimostra la figura 1.2.



Figura 1.2: Vista generale del lato ovest delle *terme centrali*.

- ✓ Il *teatro*, la cui costruzione risale al I secolo d.C., ha la struttura caratteristica di tutti i teatri romani dove gli elementi essenziali sono la cavea, l'orchestra e la scaena. La cavea è rappresentata da una gradinata semicircolare suddivisa in quattro sezioni che serviva per accogliere i diversi ceti sociali. Nella parte bassa vi era lo spazio destinato all'orchestra riservato ai notabili di Nora che vi accedevano attraverso due corridoi ("vomitoria") disposti alle estremità. Infine posto su di un piano sopraelevato rispetto alla zona dell'orchestra si trova la scaena, il palcoscenico del *teatro* costituito da un tavolato che copriva un vasto ambiente (figura 1.3) [2].



Figura 1.3: Vista generale del lato sud-est del *teatro* [2].

- ✓ Le *terme a mare* rappresentano l'edificio termale più importante di Nora e la loro costruzione risale alla fine del II secolo d.C., in piena epoca imperiale romana. Esternamente, solo sui lati Nord ed Est, l'edificio è contornato da un porticato per la passeggiata al quale si accede attraverso una piccola scalinata posta all'angolo dei portici. Dal portico si entra nell'atrio principale, posto a nord-est dell'edificio, dal quale si può accedere sia allo spogliatoio sia all'ambiente centrale del "frigidarium". Quest'ultimo presenta una nicchia absidata su di un lato e su due pareti contrapposte si trovano le vasche per le immersioni nell'acqua fredda. Infine dal "frigidarium", passando attraverso la soglia posta a Nord-Ovest, si accede agli ambienti riscaldati del "calidarium" e del "tepidarium" (figura 1.4) [1-2].

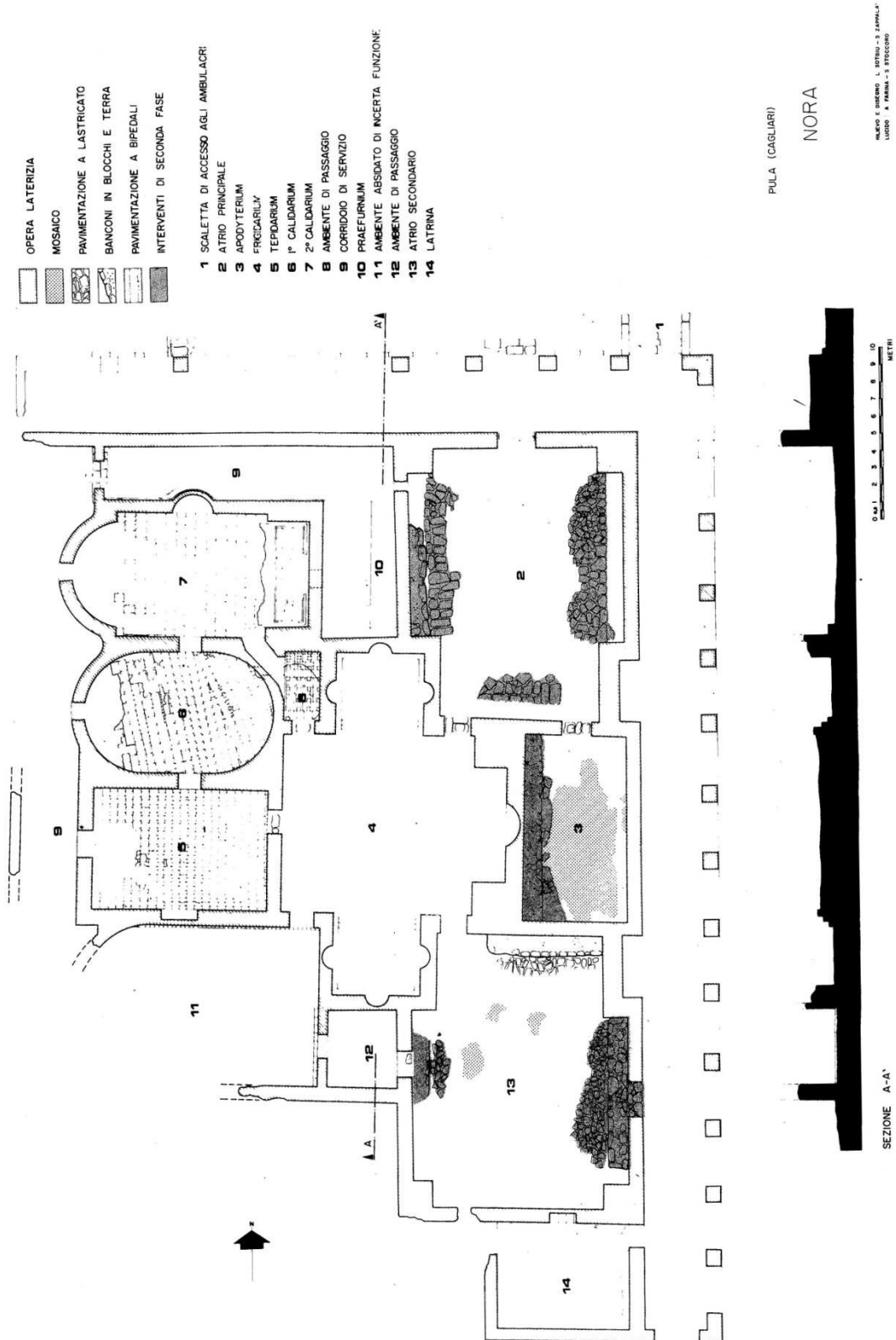


Figura 1.4: Pianta generale delle *terme a mare* [1].

## CAPITOLO 2

### DEGRADO DELLE OPERE IN CALCESTRUZZO ARMATO

Le strutture in calcestruzzo armato esposte all'azione ambientale possono subire un graduale degrado, di tipo fisico, chimico, meccanico o biologico, che interessa sia il calcestruzzo sia le armature (figura 2.1). Il danneggiamento si può verificare in alcuni casi direttamente sul calcestruzzo, che può interessare la pasta cementizia oppure gli aggregati, propagandosi in un secondo momento alle armature; mentre in altri casi l'effetto dell'ambiente, come la presenza dei cloruri, determina in un primo momento la corrosione per pitting delle armature che provoca, in seguito, anche il deterioramento del calcestruzzo. Infatti la causa più frequente del degrado delle opere in calcestruzzo armato è la corrosione delle armature [5].

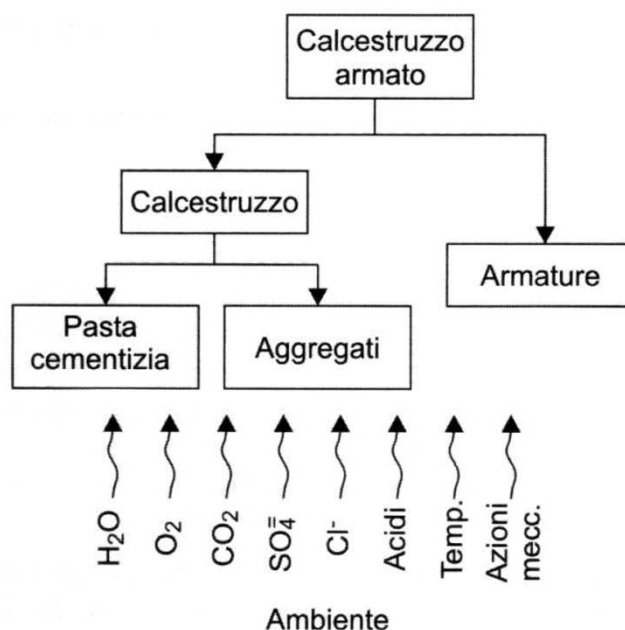


Figura 2.1: Azione dell'ambiente su una struttura in calcestruzzo armato [5].

### 2.1 DEGRADO DEL CALCESTRUZZO

Il degrado del calcestruzzo può essere causato da diversi fenomeni. Quando il progetto dell'opera e la sua realizzazione non sono effettuati in modo corretto, si può assistere ad un degrado precoce con l'apparizione di fessure e danneggiamenti, già dopo i primi giorni dalla sua posa in opera, che favoriscono l'ingresso degli agenti aggressivi provenienti dall'ambiente circostante. Questi fenomeni si possono prevenire con una corretta composizione del calcestruzzo ed una maggiore attenzione durante la costruzione dell'opera.

Tra i fenomeni più critici, che possono provocare il degrado precoce del calcestruzzo, vi sono:

- il ritiro contrastato presente sia in fase plastica, nelle prime ore dopo il getto, che al termine della stagionatura (ritiro igrometrico) provoca la fessurazione del calcestruzzo;
- l'assestamento plastico, causato dall'assestamento del calcestruzzo dopo la posa in opera genera delle fessurazioni in corrispondenza delle armature;
- il calore di idratazione, che nei getti massivi può provocare un riscaldamento maggiore del nucleo rispetto alla zona esterna che cede calore all'ambiente, crea delle tensioni in grado di provocare le fessurazioni;
- il gelo precoce, causato dal congelamento dell'impasto dopo il getto, può innescare gravi danni alla struttura.

Il deterioramento provocato dall'azione ambientale invece, che inizia dalla superficie esterna del calcestruzzo e propaga all'interno del materiale, si manifesta in tempi relativamente lunghi. Tra questi fenomeni si possono menzionare:

- l'attacco da gelo-disgelo, che si manifesta a basse temperature, causa il congelamento dell'acqua contenuta nei pori del calcestruzzo che aumentando di volume genera sforzi di trazione in grado di provocare fessure e distacchi;
- l'attacco solfatico si verifica quando il calcestruzzo è a contatto con terreni o acque dove sono presenti ioni solfato che, reagendo con i costituenti della pasta cementizia, generano dei prodotti espansivi capaci di disgregare il calcestruzzo;
- la reazione alcali-aggregati, dove alcuni tipi di aggregato possono reagire con gli ioni  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{OH}^-$  presenti nella soluzione dei pori della matrice cementizia, dando luogo a prodotti espansivi che causano il degrado del calcestruzzo [5].

## 2.2 CORROSIONE DELLE ARMATURE

La corrosione delle armature è un processo di natura elettrochimica che per poter avvenire richiede la presenza di un elettrolita. Nel caso delle strutture in calcestruzzo armato l'elettrolita è rappresentato dalla soluzione alcalina presente nei pori capillari della pasta cementizia, costituita principalmente da idrossidi di calcio, di sodio e di potassio con un pH compreso tra 13 e 14. Le armature in acciaio a contatto con soluzioni alcaline, aventi un  $\text{pH} > 11,5$  e in assenza di ioni cloruro, si rivestono di un film di ossido, il cui spessore è di pochi strati molecolari, che le protegge dalla corrosione. In queste condizioni definite di *passività* si riscontra una velocità di corrosione praticamente nulla.

Con il passare del tempo il calcestruzzo soggetto all'azione ambientale può perdere le sue caratteristiche protettive essenzialmente per tre motivi. L'anidride carbonica proveniente



dall'ambiente penetra all'interno del materiale e neutralizza l'alcalinità del calcestruzzo che è soggetto al processo della carbonatazione. Il film protettivo inoltre può essere distrutto localmente se la struttura è a contatto con ambienti contenenti ioni cloruro che possono penetrare nel calcestruzzo e raggiungere le armature. Molto raramente invece la corrosione può essere innescata da correnti disperse che interferiscono con le armature e provocano la loro depassivazione.

Una volta che la carbonatazione o i cloruri hanno raggiunto le armature, distruggendo così il film di passività che le proteggeva, la corrosione si manifesta solo se sulla loro superficie sono presenti ossigeno e acqua [6-7].

### 2.2.1 MECCANISMO ELETTROCHIMICO

La reazione elettrochimica della corrosione avviene attraverso quattro processi (figura 2.2):

- ✓ una reazione anodica: durante la quale il metallo si ossida formando i prodotti di corrosione e rende disponibili elettroni ( $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2e^-$ );
- ✓ una reazione catodica: nella quale si ha la riduzione dell'ossigeno che consuma gli elettroni prodotti dal processo anodico ( $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4e^- \rightarrow 4\text{OH}^-$ );
- ✓ la circolazione di corrente nel metallo: gli elettroni presenti nel metallo passano dalle regioni anodiche, dove vengono prodotti, a quelle catodiche, dove vengono consumati, generando un flusso di corrente convenzionale in senso opposto;
- ✓ la circolazione di corrente nel calcestruzzo: causata dalla migrazione degli ioni presenti nella soluzione dei pori del calcestruzzo a contatto con il metallo.

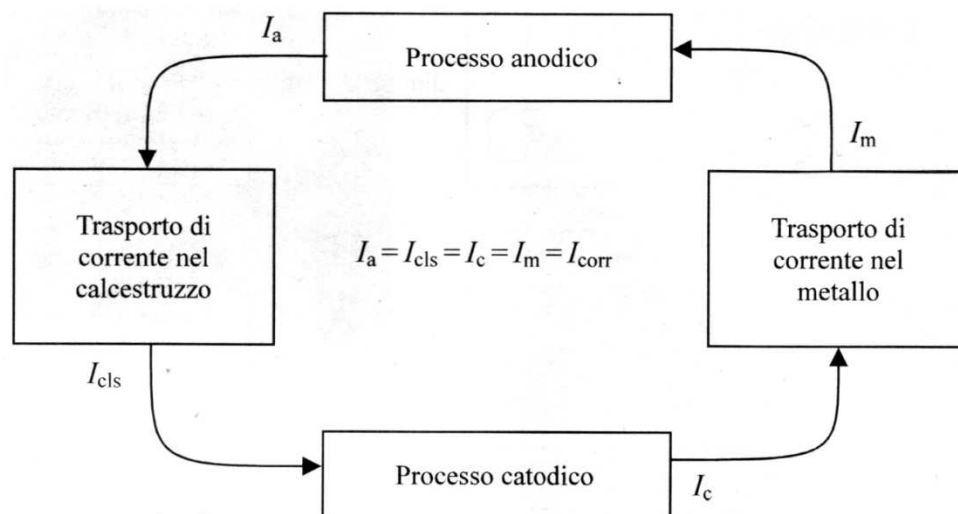


Figura 2.2: Processi che caratterizzano il meccanismo elettrochimico della corrosione [7].

I quattro processi descritti precedentemente devono essere complementari e svilupparsi quindi con la stessa velocità. Infatti in un circuito chiuso, la corrente anodica  $I_a$  (cioè il numero di elettroni prodotti dalla reazione anodica nell'unità di tempo), la corrente catodica  $I_c$  (cioè il numero di elettroni consumati dalla reazione catodica nell'unità di tempo), la corrente che circola all'interno del metallo  $I_m$ , dalle zone catodiche a quelle anodiche e la corrente che circola nel calcestruzzo  $I_{cls}$ , dalle zone anodiche a quelle catodiche, devono essere uguali:

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

indicando con  $I_{corr}$  la corrente di corrosione che circola nel sistema [7].

### 2.2.2 CONSEGUENZE DELLA CORROSIONE

Gli effetti della corrosione si possono manifestare in diversi modi. In alcuni casi si manifesta la comparsa di macchie di ruggine sulla superficie esterna del calcestruzzo, mentre in altri casi si verifica il danneggiamento del copriferro causato dall'azione espansiva dei prodotti di corrosione. Alcune volte invece non si segnala nessun degrado visibile dall'esterno, in quanto la corrosione risulta localizzata. In ogni caso l'attacco corrosivo riduce i margini di sicurezza della struttura e la rende vulnerabile ai diversi agenti aggressivi che provengono dall'ambiente esterno come l'anidride carbonica e la presenza di ioni cloruro.

Tra le conseguenze della corrosione si ha la riduzione della sezione resistente delle armature che porta di conseguenza alla diminuzione della loro capacità di sopportare i carichi. Tuttavia il problema principale è legato agli ossidi espansivi prodotti dalla corrosione all'interfaccia armature-calcestruzzo, che possono provocare la fessurazione del copriferro, una sua locale espulsione oppure una sua totale delaminazione. Inoltre la riduzione di aderenza delle armature può avere gravi conseguenze strutturali. Infine, solo su acciai ad alta resistenza suscettibili di infragilimento da idrogeno ed in particolari condizioni, il processo corrosivo può generare idrogeno atomico sulla superficie delle armature e innescare fratture fragili (figura 2.3) [6-7].

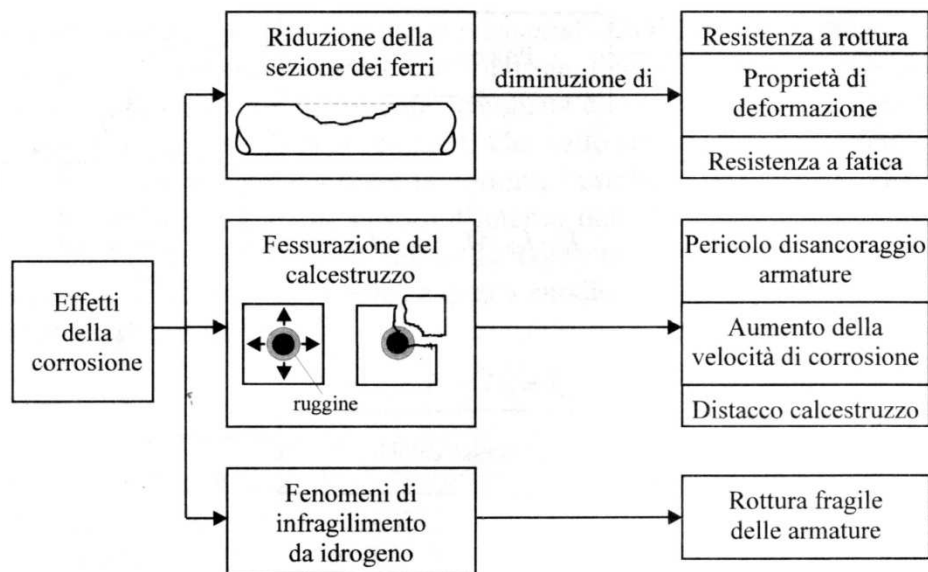
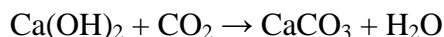


Figura 2.3: Conseguenze causate dalla corrosione delle armature [7].

### 2.2.3 CORROSIONE DA CARBONATAZIONE

La corrosione promossa dalla carbonatazione avviene quando l’anidride carbonica presente nell’atmosfera viene a contatto con il calcestruzzo, neutralizzando a partire dagli strati più esterni i suoi componenti alcalini. La reazione di carbonatazione, che si produce attraverso varie reazioni intermedie, può essere riassunta come:



Il processo della carbonatazione abbassa quindi il pH della soluzione alcalina presente nei pori del calcestruzzo, dai valori iniziali compresi tra 13 e 14 a valori vicini alla neutralità, distruggendo così il film di passività che proteggeva l’acciaio.

L’armatura, che in un primo momento si trova a contatto con la soluzione alcalina presente nei pori della matrice cementizia, si riveste di un film di ossido che la protegge dalla corrosione rendendola quindi passiva. Con il passare del tempo l’anidride carbonica penetra nel calcestruzzo a partire dalla superficie esterna, interessando prima la zona del copriferro e successivamente l’armatura provocandone la corrosione.

L’acciaio ormai depassivato si corrode con una velocità che dipende dalle condizioni di esposizione ambientale in cui si trova la struttura. I prodotti di corrosione che si formano, occupando un volume fino a sei volte superiore rispetto a quello del ferro da cui derivano, provocano così la fessurazione e il distacco del copriferro compromettendo la stabilità della struttura.

Durante il progetto degli elementi strutturali in calcestruzzo armato per definire la loro vita di servizio è bene quindi effettuare una distinzione tra periodo di innesco e periodo di propagazione. Il tempo di innesco è definito come il periodo nel quale la carbonatazione

eguaglia lo spessore del copriferro, mentre quello di propagazione comincia quando l'armatura raggiunta ormai dalla carbonatazione risulta depassivata e termina quando viene raggiunto un certo stato limite, al di sopra del quale non vengono più tollerate le conseguenze della corrosione (figura 2.4) [5-6].

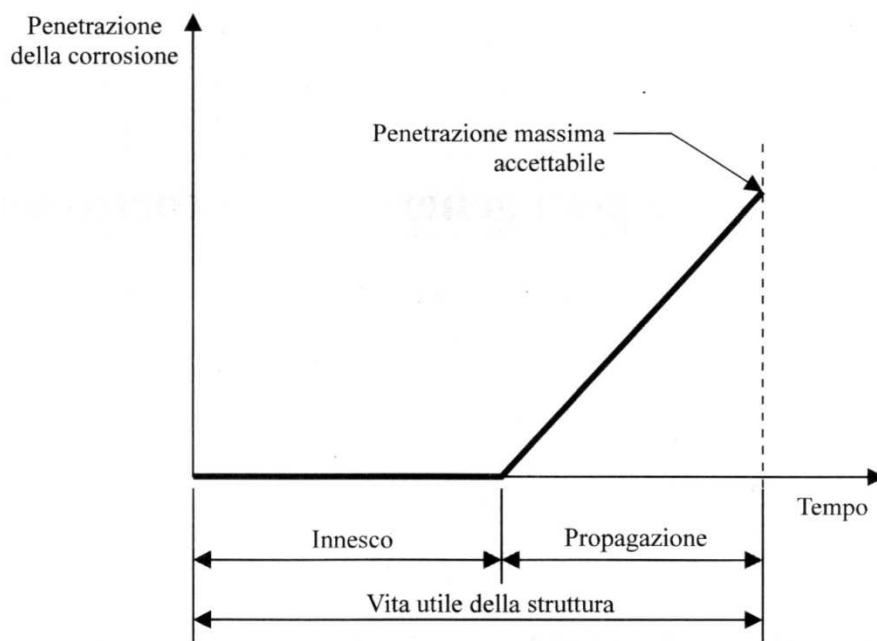


Figura 2.4: Periodo di innesco e di propagazione della corrosione in una struttura in calcestruzzo armato [7].

### 2.2.3.1 INNESCO DELLA CORROSIONE

Il periodo di innesco della corrosione dipende dalla velocità di penetrazione della carbonatazione e dallo spessore di copriferro. La carbonatazione, che inizia dalla superficie esterna del calcestruzzo, avanza in modo proporzionale alla radice quadrata del tempo:

$$x = K \cdot \sqrt{t}$$

dove  $x$  rappresenta la profondità di carbonatazione in mm,  $K$  è il coefficiente di carbonatazione espresso in  $\text{mm/anno}^{1/2}$  e  $t$  è il tempo in anni.

Il coefficiente  $K$ , che esprime la velocità di penetrazione della carbonatazione, dipende sia da fattori legati alla composizione del calcestruzzo sia da fattori ambientali.

Con riferimento ai fattori ambientali, il contenuto di umidità riveste un ruolo importante in quanto la velocità di carbonatazione risulta trascurabile sia in un calcestruzzo secco, nel quale l'anidride carbonica non riesce a reagire con i suoi componenti alcalini a causa dell'assenza di umidità, che in un calcestruzzo saturo d'acqua, dove la diffusione dell'anidride carbonica è impedita dall'acqua contenuta nei pori. In una struttura si riscontra una velocità di carbonatazione maggiore dove ci sono zone riparate dalla pioggia ed in equilibrio con

l'atmosfera con 60-80% di umidità relativa, rispetto a quelle non riparate (figura 2.5). Infine all'aumentare del contenuto di anidride carbonica nell'atmosfera e della temperatura si riscontra un aumento della profondità di carbonatazione.

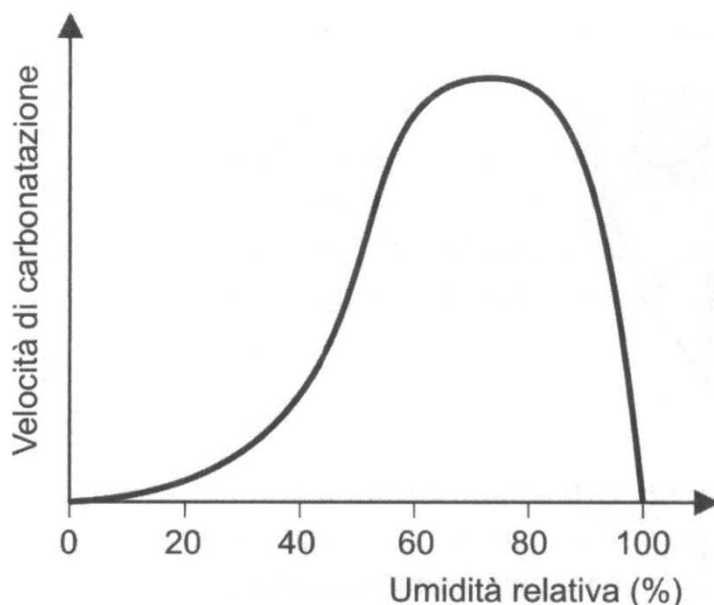


Figura 2.5: Profilo della velocità di carbonatazione in funzione dell'umidità relativa del calcestruzzo, in assenza di bagnatura [5].

Per quanto riguarda i fattori legati alla composizione del calcestruzzo si riscontra che la capacità di fissare l'anidride carbonica è legata all'alcalinità presente nella sua pasta cementizia che dipende dal tipo e dalla quantità di cemento utilizzato (figura 2.6). Rispetto al cemento portland, dove circa il 64% del peso di cemento è costituito da ossido di calcio, nei cementi di miscela, nei quali l'idratazione dei materiali pozzolanici o della loppa d'altoforno porta ad un minor contenuto di  $\text{Ca(OH)}_2$  nella pasta cementizia, si può riscontrare un aumento della velocità di carbonatazione, soprattutto quando il calcestruzzo non viene adeguatamente stagionato. Infine una bassa porosità capillare della pasta cementizia ottenuta attraverso la diminuzione del rapporto acqua/cemento rallenta la penetrazione della carbonatazione [5-7].

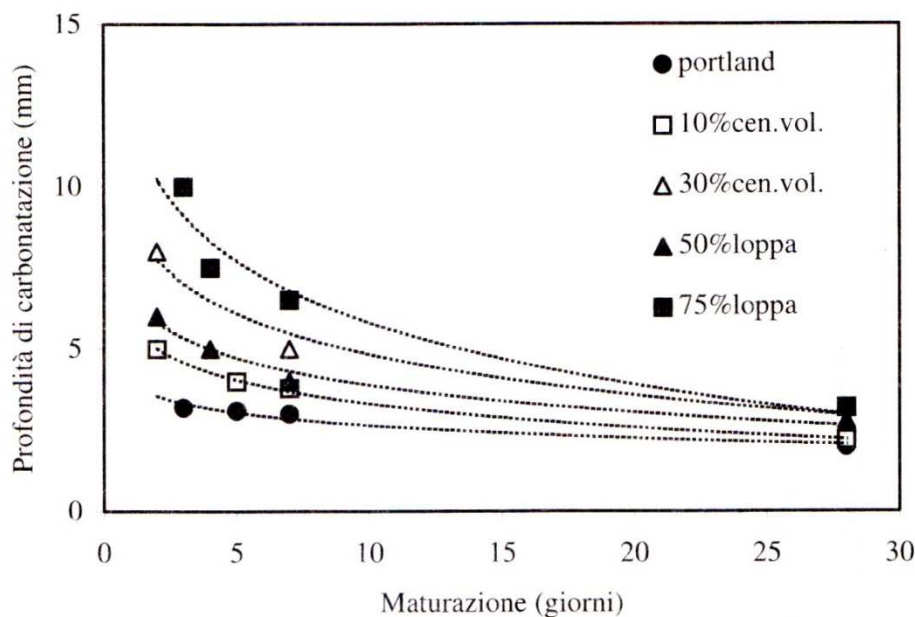


Figura 2.6: Confronto della profondità di carbonatazione in funzione del periodo di stagionatura per diverse paste cementizie, mantenute per 6 mesi in un ambiente con 0,03% di CO<sub>2</sub> [7].

### 2.2.3.2 PROPAGAZIONE DELLA CORROSIONE

Quando la profondità di carbonatazione raggiunge l'armatura, che risulta depassivata, la velocità di corrosione dipende dalla disponibilità di acqua e ossigeno presenti sulla superficie dell'acciaio.

Un parametro importante legato alla velocità della corrosione è rappresentato dalla resistività elettrica del calcestruzzo, che dipende dal suo contenuto di umidità. Valori di resistività elevati si riscontrano in un calcestruzzo secco dove la velocità di corrosione risulta trascurabile, mentre all'aumentare dell'umidità nel calcestruzzo, la resistività diminuisce e la velocità di corrosione aumenta (figura 2.7). Si può quindi dedurre che la velocità di corrosione delle armature dipende dalle variazioni di umidità del calcestruzzo in prossimità delle armature. Ovviamente una delle situazioni peggiori è quella caratterizzata da un'alternanza del contenuto di umidità, come succede nelle strutture di calcestruzzo esposte alla pioggia.

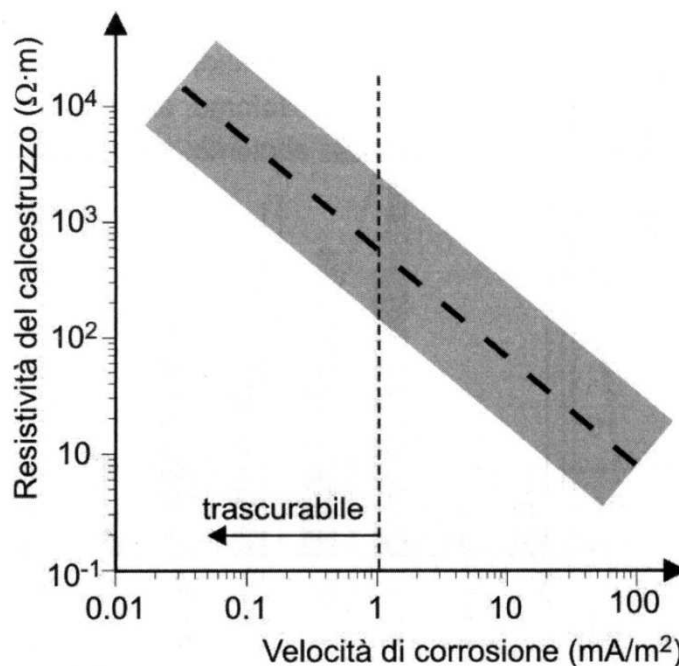


Figura 2.7: Andamento approssimato del legame tra velocità di corrosione e resistività elettrica del calcestruzzo carbonatato [5].

Inoltre nelle strutture in calcestruzzo armato carbonatato si osserva che il potenziale di corrosione delle armature, che dipende anch'esso dal contenuto di umidità, assume valori positivi quando il calcestruzzo è secco e quindi la velocità di corrosione è trascurabile, mentre tende a diminuire, come la resistività elettrica, quando vi è un aumento dell'umidità e quindi della velocità di corrosione.

Infine si può riscontrare un aumento della velocità di corrosione delle armature per la presenza di piccoli tenori di cloruri nella soluzione dei pori del calcestruzzo, che può essere dovuta all'impiego di materie prime contenenti questi ioni o alla loro penetrazione dall'ambiente esterno [5].

#### 2.2.4 CORROSIONE DA CLORURI

Le armature presenti in un calcestruzzo alcalino non carbonatato possono essere soggette ad una corrosione altamente pericolosa chiamata pitting dovuta alla presenza dei cloruri che possono penetrare dall'ambiente esterno (ambiente marino, sali antigelo) o possono essere stati aggiunti nel getto tramite l'acqua d'impasto o gli aggregati (utilizzando sabbia di mare non lavata) o tramite gli additivi, come il cloruro di calcio (ora vietato) che era l'additivo accelerante di indurimento più impiegato in passato. La corrosione per pitting si riscontra maggiormente all'aumentare del contenuto di cloruri e di ossigeno presenti nell'ambiente. Questo tipo di attacco si verifica quando, nella soluzione dei pori a contatto con l'armatura, la concentrazione degli ioni cloruro supera una determinata soglia in grado di rompere il film di

passività che la protegge, definito tenore critico di cloruri. Questo valore dipende dal potenziale di corrosione delle armature che è legato a sua volta alla quantità di ossigeno che raggiunge la loro superficie [6-7].

### 2.2.4.1 MECCANISMO DELL'ATTACCO CORROSIVO

Questo tipo di attacco corrosivo inizia con la rottura del film di ossido (periodo di innesco) e si propaga con la penetrazione della corrosione nella zona dove il film è stato danneggiato (periodo di propagazione). La corrosione per pitting è molto pericolosa in quanto la zona anodica interessata dalla corrosione risulta estremamente piccola rispetto alla zona catodica ancora passiva che la circonda (figura 2.8). Inoltre le conseguenti variazioni di pH creano delle condizioni di acidità che causano una maggiore aggressività nella zona anodica. Si verifica la circolazione di corrente nell'ambiente dalla zona anodica a quella catodica che determina la migrazione dei cloruri, ioni con carica negativa, verso la zona anodica.

L'elevata differenza tra l'area occupata dalla zona anodica e quella della zona catodica porta ad un rapporto molto basso, causando un elevato valore della densità di corrente anodica e quindi della velocità di penetrazione dell'attacco corrosivo [5].

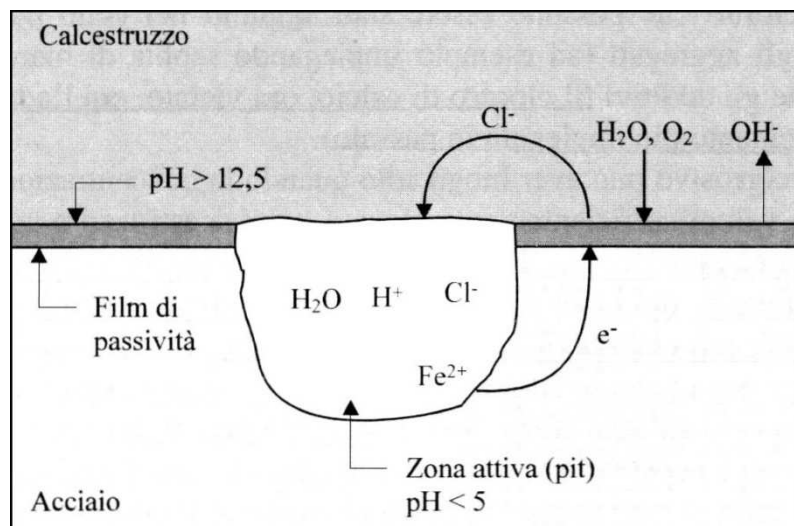


Figura 2.8: Meccanismo dell'attacco corrosivo dei cloruri sull'acciaio [7].

### 2.2.4.2 PENETRAZIONE DEI CLORURI

Il periodo di innesco della corrosione, necessario affinché alla profondità delle armature i cloruri raggiungano il tenore critico, dipende dalla loro concentrazione sulla superficie esterna del calcestruzzo, dallo spessore di copriferro, dalle caratteristiche della pasta cementizia e dal loro contenuto critico. Il profilo della concentrazione dei cloruri presenta un andamento di tipo decrescente, infatti sulla superficie esterna vi è un contenuto elevato di cloruri che



diminuisce entrando in profondità. Questo andamento dipende da diversi fattori tra i quali vi sono la concentrazione dei cloruri nell'ambiente, le proprietà del calcestruzzo ed infine il meccanismo di trasporto dei cloruri all'interno della soluzione della pasta cementizia, che può avvenire per diffusione, assorbimento capillare, permeazione e migrazione.

In generale in una struttura in calcestruzzo armato la penetrazione dei cloruri dipende anche dalla sua geometria e dall'esposizione. Si può osservare che su una struttura parzialmente immersa in acqua di mare ed esposta a cicli di asciutto/bagnato i cloruri penetrano per assorbimento capillare durante i periodi di bagnato, mentre nei periodi di asciutto, durante l'evaporazione dell'acqua, si ha un accumulo di ioni cloruro sulla superficie. Inoltre se la struttura è esposta agli agenti atmosferici i cloruri presenti negli strati superficiali possono venire dilavati dall'azione della pioggia (figura 2.9) [5-6].

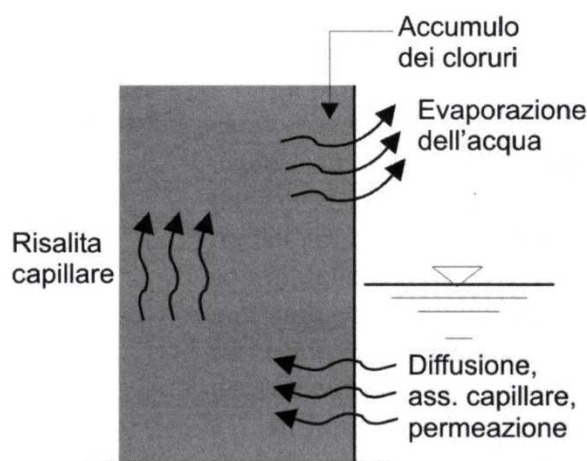


Figura 2.9: Meccanismi di penetrazione delle sostanze disciolte in acqua di mare, come i cloruri, in una struttura marina [5].

### 2.2.4.3 TENORE CRITICO DI CLORURI

L'innesco della corrosione causata dai cloruri si verifica quando la concentrazione di questi ioni presenti sulla superficie dell'armatura supera un certo tenore critico che dipende essenzialmente dal potenziale delle armature, dal pH della soluzione presente nei pori del calcestruzzo e dalla presenza di bolle d'aria intrappolate all'interfaccia tra armatura e calcestruzzo.

Analizzando i tre fattori principali si può osservare che il potenziale dell'armatura dipende dal contenuto di umidità del calcestruzzo che determina la disponibilità di ossigeno sulla superficie dell'acciaio. In generale si può dedurre che per le strutture aerate e non carbonatate, dove l'ossigeno riesce a raggiungere facilmente la superficie dell'armatura grazie alla

presenza dei pori vuoti, il rischio di corrosione per pitting risulta basso per contenuti di cloruri inferiori a 0,4%, in massa rispetto al cemento, ed elevato per tenori superiori all'1%.

Per quanto riguarda le strutture in calcestruzzo armato completamente immerse in acqua di mare, dove i pori risultano saturi d'acqua e le armature sono caratterizzate da potenziali molto negativi (minori di  $-500$  mV vs Cu/CuSO<sub>4</sub>), il contenuto di ossigeno presente sulla superficie dell'armatura è minimo e quindi la corrosione per pitting si innesca raramente.

Un altro fattore da cui dipende il contenuto critico dei cloruri è rappresentato dal pH della soluzione presente nei pori del calcestruzzo. Si è riscontrato infatti che si ha una diminuzione del tenore critico di cloruri al diminuire del pH della soluzione, che dipende a sua volta dal tipo di cemento, dalle eventuali aggiunte minerali e dalla carbonatazione.

Infine si è osservato che diminuendo il volume dell'aria intrappolata nel calcestruzzo a contatto con l'armatura da 2% a 0,2% in volume, il contenuto critico di cloruri può subire un aumento da 0,2% a 2% in massa rispetto al cemento.

La valutazione del tenore critico di cloruri risulta quindi di difficile determinazione e pertanto può essere solo definito su base statistica [5].

#### **2.2.4.4 PROPAGAZIONE DELLA CORROSIONE**

Una volta che la corrosione per pitting si è innescata, si crea un ambiente molto aggressivo all'interno della zona interessata dall'attacco, mentre il film passivo esterno viene rafforzato. Questo tipo di attacco localizzato può raggiungere una velocità di penetrazione molto elevata, fino a 1mm/anno quando il calcestruzzo è umido ed è presente un elevato contenuto di cloruri, causando in tempi relativamente brevi un'eccessiva riduzione della sezione resistente dell'armatura.

Oltre alla riduzione della sezione resistente dell'armatura, tra le conseguenze della corrosione causate da questo tipo di attacco, si può verificare anche la perdita di duttilità prodotta dall'attacco localizzato, che può avere gravi conseguenze sul comportamento sismico delle strutture. Si possono verificare delle conseguenze strutturali ancora prima che gli effetti della corrosione si manifestino sulla superficie del calcestruzzo.

La valutazione del periodo di propagazione di questo tipo di attacco corrosivo risulta difficoltosa, sia per l'elevata velocità di penetrazione dell'attacco localizzato sia per la complessità di prevedere i suoi effetti sul comportamento strutturale, e pertanto non viene preso in considerazione [5].

## **CAPITOLO 3**

### **ISPEZIONE DEGLI ELEMENTI IN CALCESTRUZZO**

Il sito archeologico di Nora a Pula è stato oggetto di un approfondito sopralluogo durante il quale sono state esaminate le condizioni di conservazione delle strutture in calcestruzzo presenti nelle tre aree già descritte nel primo capitolo: *le terme centrali* (zona 1), *il teatro* (zona 2), e *le terme a mare* (zona 3 e zona 4).

Nel primo capitolo si è descritto in modo generale il sito archeologico basandosi sulla bibliografia disponibile, e raccogliendo le informazioni relative all'esecuzione delle diverse opere che caratterizzano le zone analizzate.

#### **3.1 METODOLOGIA D'INDAGINE**

Per descrivere le diverse aree oggetto di studio sono stati eseguiti dei rilievi geometrici che riportano le diverse zone nelle quali è stata attuata un'ispezione con lo scopo di effettuare la valutazione del loro stato attuale. In Appendice A vengono riportati tutti i rilievi geometrici effettuati nelle diverse zone.

La metodologia attuata in campo è stata caratterizzata da un'osservazione visiva, ampiamente documentata, volta a evidenziare e localizzare la presenza di danneggiamenti macroscopici presenti sulle diverse strutture; in seguito, su ogni zona sono state utilizzate tecniche non distruttive ed elettrochimiche al fine di valutarne lo stato di conservazione e stimarne le condizioni di corrosione. Infine per definire le varie forme di degrado si è reso necessario anche il prelievo di campioni di calcestruzzo sui quali sono state eseguite delle analisi di laboratorio.

In questo paragrafo vengono illustrati i diversi passaggi che sono stati effettuati in situ per l'indagine delle strutture in calcestruzzo.

##### **3.1.1 OSSERVAZIONE VISIVA**

Tramite l'ispezione visiva si sono potute verificare e documentare le condizioni attuali delle diverse aree semplicemente osservando come si presenta la superficie del calcestruzzo. Durante l'osservazione, limitata alle sole superfici visibili, si sono individuati e documentati i difetti e le varie forme di degrado sia sul calcestruzzo, come la presenza di fessure e distacchi del copriferro, sia sulle barre d'armatura dovute alla loro corrosione. Per ogni tipo di danno

subìto dall'opera è stata rilevata la sua estensione e posizione rispetto alla struttura, nonché l'esposizione geografica per verificare un'eventuale influenza sul degrado stesso.

Correlando questo tipo di dati con le informazioni raccolte sulle strutture e sull'ambiente si sono formulate delle prime ipotesi sul tipo di degrado al fine di individuare i punti dove effettuare indagini più approfondite [5].

### **3.1.2 TECNICHE NON DISTRUTTIVE**

Alcune di queste tecniche, che riguardano le misure dello spessore di copriferro e quelle sclerometriche, sono state applicate solo nella zona 1 delle *terme centrali* in quanto si sono riscontrate delle strutture in calcestruzzo che presentano delle armature longitudinali e trasversali. Nelle zone 2 e 3, invece, sono stati individuati solo in alcuni punti dei fili di ferro, mentre la zona 4 è risultata armata.

In questo tipo di tecniche rientrano anche quelle elettrochimiche, le cui misure sono indispensabili per localizzare le zone in cui l'armatura si corrode senza dover ricorrere alla rimozione del copriferro, in quanto i risultati di queste misure sono strettamente legati allo svolgimento del processo corrosivo.

In particolare i dati ottenuti dalla misura del potenziale permettono di individuare le zone dell'armatura in cui ha avuto inizio un processo di corrosione, prima che il degrado propaghi e diventi evidente anche sulla superficie del calcestruzzo; mentre la misura della resistività può essere utile per valutare le variazioni subite dal calcestruzzo nel tempo [5].

I paragrafi che seguono illustrano il procedimento delle diverse prove.

#### **3.1.2.1 MISURA DELLO SPESSORE DI COPRIFERRO**

Questo tipo di misura fornisce lo spessore del copriferro e permette di individuare la posizione delle barre d'armatura. Confrontando i risultati ottenuti con la profondità raggiunta dalla carbonatazione o dai cloruri si può verificare se le armature sono state raggiunte da questi agenti aggressivi e valutare dei possibili interventi di ripristino.

Per effettuare la misura è stato utilizzato un rilevatore magnetico che rileva l'interazione tra le barre e i campi magnetici a bassa frequenza sfruttando il principio dell'induzione magnetica. Lo strumento, che viene appoggiato sulla superficie del calcestruzzo, individua l'armatura se giace entro il suo campo d'influenza, registrando un segnale più intenso quando si trova direttamente al di sopra della stessa [5].

### 3.1.2.2 MISURE SCLEROMETRICHE

Per eseguire questa misura è stato utilizzato lo sclerometro (martello di Schmidt), uno strumento costituito da una massa battente di acciaio azionata da una molla che colpisce un pistone posto a contatto con la superficie. La prova viene condotta tenendo il pistone in posizione perpendicolare rispetto alla superficie del calcestruzzo e premendolo lentamente su di esso, fino ad arrivare al limite quando la massa colpisce il retro del pistone e rimbalza. Il risultato è espresso in unità sclerometriche.

Questo metodo basato sul principio del rimbalzo è utilizzato per valutare in situ l'uniformità del calcestruzzo e per evidenziare le zone della struttura in cui il calcestruzzo è degradato o di qualità scadente. Il risultato di questa misura può essere influenzato da diversi fattori quali il tipo di aggregato, le condizioni di umidità, la ruvidità della superficie e la carbonatazione del calcestruzzo, che produce un aumento della durezza del calcestruzzo sovrastimando la sua resistenza.

La diminuzione dell'indice sclerometrico può indicare la presenza di un degrado superficiale del calcestruzzo. Inoltre, ricorrendo a delle curve di correlazione di natura empirica o curve di taratura diretta, questi valori possono essere trasformati ricavando una stima della resistenza a compressione del calcestruzzo [5].

Facendo riferimento a diverse normative (ISO 1920-7, ASTM C 805, EN 12504-2, EN 12398) [8÷11], la prova è stata eseguita effettuando 10 battute su una superficie liscia, orizzontale e verticale.

### 3.1.2.3 MISURA DEL POTENZIALE

Per determinare il potenziale delle armature è stato utilizzato un elettrodo di rame/solfato di rame saturo ( $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ ) costituito da una barra in rame immersa in una soluzione saturo di solfato di rame. L'elettrodo, il cui potenziale è di +318 mV rispetto all'elettrodo a idrogeno (SHE), è stato posto a contatto con la superficie del calcestruzzo attraverso una spugna imbevuta d'acqua ed il contatto elettrolitico con l'ambiente si è verificato attraverso un setto poroso di materiale ceramico. L'elettrodo è stato collegato al polo negativo di un voltmetro ad alta impedenza ( $>10 \text{ M}\Omega$ ), mentre all'armatura viene pinzato un morsetto collegato al polo positivo. Per migliorare il contatto elettrico è stata eseguita la pulizia dell'armatura nella zona di contatto, rimuovendo dalla sua superficie gli eventuali prodotti di corrosione. L'elettrodo rileva il campo elettrico che si genera all'interno del calcestruzzo fornendo il potenziale del metallo (figura 3.1) [5].



Figura 3.1: Misura del potenziale in situ sulla faccia nord-ovest del pilastro A della zona 1.

#### 3.1.2.4 MISURA DELLA RESISTIVITA' ELETTRICA

Per misurare la resistività elettrica del calcestruzzo è stato utilizzato un conduttimetro che fornisce il valore della conduttanza  $C$  in microS ( $\mu\text{S}$ ) del calcestruzzo tra i due elettrodi metallici collegati allo strumento. Le piastre sono state premute contro la superficie del calcestruzzo interponendo una spugna imbevuta d'acqua per migliorare il contatto (figura 3.2).



Figura 3.2: Misura della conduttanza in situ tra la faccia nord-ovest e sud-est della trave D della zona 1.

L'inverso del valore della conduttanza (espressa in Siemens) fornisce quello della resistenza  $R$  in ohm ( $\Omega$ ), opposta al passaggio della corrente nel materiale. Infine dalla resistenza si risale al valore della resistività elettrica del calcestruzzo, espressa in ohm·m ( $\Omega\text{m}$ ):  $\rho=A/C\cdot L$ , dove  $A$  è l'area in  $\text{m}^2$  della singola piastra che costituisce l'elettrodo pari a  $0,0324 \text{ m}^2$  (misura lato  $0,18 \text{ m}$ ) ed  $L$  è la distanza in  $\text{m}$  tra le piastre, pari allo spessore della singola trave o del singolo pilastro [5].

### 3.1.3 PRELIEVO DI CAMPIONI E ANALISI SUL CALCESTRUZZO

Per completare l'analisi dello stato di conservazione delle strutture e approfondire le diverse cause di degrado, sono stati prelevati dei campioni di calcestruzzo (tecnica di tipo distruttivo), sui quali è stata effettuata in situ la misura della profondità di carbonatazione e successivamente in laboratorio la misura della concentrazione dei cloruri (paragrafo 4.2).

I campioni di calcestruzzo di solito sono ottenuti mediante carotaggio, ma in campo non c'era la possibilità di utilizzare questo strumento e quindi si è ricavata della polvere dalla struttura attraverso l'utilizzo di un trapano. Si è utilizzata una punta di  $11 \text{ mm}$  di diametro, sulla quale sono state segnate delle tacche ad intervalli di circa  $20 \text{ mm}$ , effettuando dei fori di diversa lunghezza e prelevando la polvere ad ogni intervallo. La polvere così ottenuta è stata raccolta in bustine di plastica richiudibili e immediatamente identificate con opportuna sigla.

Infine sono stati raccolti anche dei frammenti di calcestruzzo di forma irregolare, che si sono staccati in diversi punti della struttura a causa della corrosione delle barre d'armatura. Su alcuni di questi frammenti sono state effettuate anche delle prove di laboratorio.

#### 3.1.3.1 MISURA DELLA PROFONDITA' DI CARBONATAZIONE

La profondità di carbonatazione è stata misurata in situ spruzzando una soluzione idroalcolica di fenolftaleina, che è un indicatore di pH, sulla polvere di calcestruzzo appena prelevata o sulla superficie fresca di rottura dei frammenti raccolti. Se il calcestruzzo assume una colorazione rosa tipica della soluzione in ambiente alcalino non risulta carbonatato, mentre se il calcestruzzo non modifica il suo colore risulta carbonatato [5].

La prova alla fenolftaleina fornisce, a meno di qualche variazione, un risultato attendibile della profondità di carbonatazione quando viene effettuata su un campione di carota di calcestruzzo. Tenendo presente che i campioni prelevati sono sotto forma di polvere di calcestruzzo e che ogni avanzamento è di circa  $20 \text{ mm}$ , in questo caso è stato possibile effettuare solo una stima approssimata della profondità di carbonatazione.

### 3.2 RISULTATI DELLE TERME CENTRALI – ZONA 1

La prima zona che si è analizzata è stata quella delle *terme centrali*, identificata come zona 1 (figura 3.3). Come già accennato nel primo capitolo, questa zona durante gli anni 1960-70 è stata interessata da un intervento di manutenzione caratterizzato dalla costruzione di un impalcato costituito da quattro travi e quattro pilastri al fine di sorreggere un pavimento in mosaico e di proteggerne un altro posto al di sotto dello stesso.



Figura 3.3: Vista generale del lato ovest delle *terme centrali* – zona 1.

Nel rilievo geometrico di figura A.1 riportato in Appendice A si sono evidenziate con una campitura le strutture oggetto di studio indicando con la lettera P e T rispettivamente i pilastri e le travi, che sono stati identificati con una seconda lettera (A-D).

Dai rilievi si ricava che i pilastri presentano una forma quadrata di 25x25 cm (PA e PC) e di 26x26 cm (PB e PD) ed un'altezza che varia da 130 a 177 cm. Le travi invece presentano una larghezza di 20/21 cm, un'altezza che varia da 50 a 62 cm ed una lunghezza di 440 cm per le travi TA, TB, TC e di 354 cm per la trave TD in quanto l'ultimo pilastro PD risulta arretrato rispetto agli altri, come si può notare dal rilievo geometrico.

Le figure A.2÷A.7 riportano i rilievi geometrici che completano l'area in oggetto in base all'esposizione, sui quali sono stati indicati i sistemi di riferimento per individuare le zone di ispezione e i punti in cui sono stati prelevati i diversi campioni. Per quanto riguarda i pilastri, si è scelto un sistema di riferimento avente l'origine nello spigolo in basso a sinistra, caratterizzato da un'ascissa X che riporta la misura della base del singolo pilastro e da



un'ordinata Y che ne riporta l'altezza. Per le travi invece il sistema di riferimento scelto, avente l'origine sulla faccia esterna del rispettivo pilastro, è costituito da un'ascissa X che riporta il valore della lunghezza della singola trave e da un'ordinata Y che ne riporta l'altezza. In appendice B vengono riportati i risultati delle misure effettuate in situ.

### 3.2.1 OSSERVAZIONE VISIVA

Attraverso l'osservazione visiva della zona 1 delle *terme centrali* si sono evidenziati diversi tipi di degrado sia sul calcestruzzo che sulle armature.

In particolare, come si può notare dalle figure 3.4 e 3.5, in alcuni pilastri identificati sul rilievo geometrico come pilastro A e pilastro C (PA e PC) si è riscontrata la completa mancanza del copriferro, causato dalla corrosione delle barre d'armatura. Per quanto riguarda il pilastro C, nella figura 3.6a si può evidenziare come la sezione dei ferri si sia ridotta in modo eccessivo fino ad annullarsi in certi punti provocando quindi il loro distacco, mentre nella figura 3.6b si possono chiaramente vedere i frammenti di ossidi che derivano dai prodotti di corrosione.

Il copriferro si è parzialmente distaccato anche dallo spigolo del pilastro B (figura 3.7a), mentre nell'immagine di figura 3.7b è ben visibile la superficie di distacco del calcestruzzo presente sulla trave A (TA).

Un altro danneggiamento ben visibile è rappresentato dalle fessure nel calcestruzzo presenti per esempio nel pilastro D (PD) e B (PB) mostrate in figura 3.8a-b che presentano un andamento longitudinale e sono disposte lungo le barre d'armatura. Queste fessure, accompagnate da espulsioni di calcestruzzo, sono state causate chiaramente dalla corrosione delle armature.

Per quanto riguarda le travi sono stati osservati dei distacchi della superficie del calcestruzzo e in diversi punti anche l'espulsione di porzioni di copriferro.

In conclusione si può affermare che il degrado di questa zona, dovuto principalmente alla corrosione delle barre d'armatura, sia particolarmente esteso senza riscontrare una particolare influenza dovuta alla posizione (coperta/scoperta) o all'esposizione degli elementi considerati (nord, sud, est, ovest).



Figura 3.4: Vista sud-ovest dei pilastri A, B e C (partendo da destra) della zona 1-*terme centrali*. In rosso sono evidenziati i pilastri A e C caratterizzati dalla mancanza del copriferro.



*a*



*b*

Figura 3.5a: Vista ovest del pilastro e della trave A; b Vista sud del pilastro e della trave C.



Figura 3.6: Particolare della corrosione delle armature del pilastro C. In rosso sono evidenziati il distacco delle staffe (a) e i frammenti di ossido che derivano dai prodotti di corrosione (b).



Figura 3.7a: Vista sud del pilastro B, con l'indicazione del distacco del copriferro;  
b: Particolare della superficie di distacco del copriferro della trave A lato sud-est.

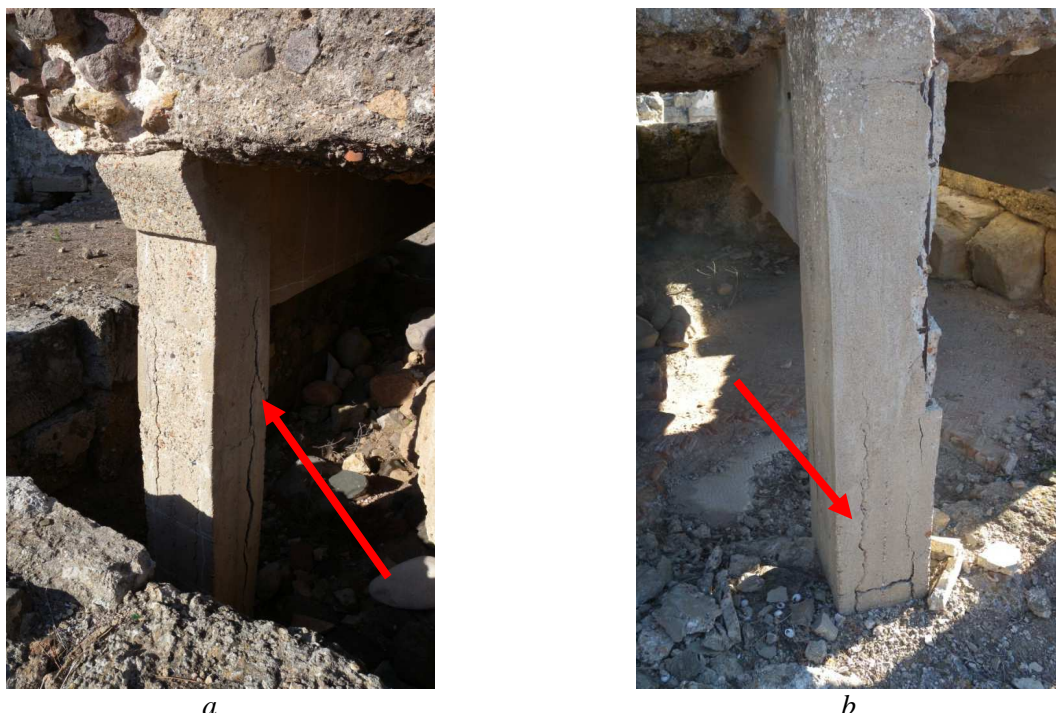


Figura 3.8a: Vista sud del pilastro D; b: Vista ovest del pilastro B della zona 1–terme centrali. In rosso sono indicate le fessure.

### 3.2.2 TECNICHE NON DISTRUTTIVE

#### SPESSORE DI COPRIFERRO

La misura è stata effettuata sia sui pilastri che sulle travi facendo riferimento alle sole staffe, che presentano un diametro pari a 8 mm.

Per quanto riguarda i pilastri queste misure sono state effettuate in posizione centrale (X pari alla metà della base del pilastro) a diverse altezze solo sul lato sud-ovest, in funzione della posizione di ogni staffa individuata dal rilevatore magnetico. Dai risultati ottenuti si osserva che il pilastro B presenta uno spessore di copriferro compreso tra 22 e 31 mm, maggiore rispetto a quello misurato nel pilastro D, che varia da 19 a 24 mm (figura B.1 riportata in Appendice B).

Questa misura non si è potuta effettuare sulla superficie dei pilastri A e C in quanto risultano privi del copriferro (figura 3.4).

Per quanto riguarda le travi, invece, la misura ha interessato tutta la loro lunghezza, sia sul lato sud-est che sul lato nord-ovest. In questo caso ogni misura è individuata da un valore X che riporta il valore crescente della lunghezza della trave e da un valore Y pari alla metà dell'altezza della singola trave (figure A.2, A.4÷A.6).

Dai valori di copriferro, riportati nelle tabelle B.2 e B.3 e riassunti nella tabella 3.1, si può notare che lo spessore del copriferro presenta un'elevata variabilità, che risulta più marcata sul lato sud-est della trave A.

ELEMENTO	SUD-EST			NORD-OVEST		
	MIN	MAX	MEDIA	MIN	MAX	MEDIA
<b>TRAVE TA</b>	<b>6</b>	<b>28</b>	<b>14</b>	<b>8</b>	<b>16</b>	<b>12</b>
<b>TRAVE TB</b>	<b>8</b>	<b>20</b>	<b>17</b>	<b>5</b>	<b>20</b>	<b>15</b>
<b>TRAVE TC</b>	<b>6</b>	<b>19</b>	<b>13</b>	<b>12</b>	<b>16</b>	<b>14</b>
<b>TRAVE TD</b>	<b>12</b>	<b>20</b>	<b>15</b>	<b>10</b>	<b>18</b>	<b>12</b>

Tabella 3.1: Valori minimo, massimo e medio del copriferro delle travi sulle facce sud-est e nord-ovest.

Da questi dati si può osservare che le travi presentano uno spessore di copriferro medio inferiore rispetto a quello dei pilastri, in particolare di 15 mm con esposizione sud-est e di 13 mm con esposizione nord-ovest.

Infine sulla superficie del calcestruzzo dei pilastri e delle travi è stato tracciato, con un semplice gesso bianco, un reticolo che riporta la posizione delle staffe e dell'armatura longitudinale, che è stato utilizzato successivamente come base per effettuare la misura del potenziale e della resistività elettrica del calcestruzzo.

### SCLEROMETRO

Per i pilastri la posizione della misura è fornita da un valore X pari alla metà dello spessore del pilastro e da un valore Y pari a 1400 mm; mentre per le travi si riporta un valore X che varia da 1000 a 1500 mm in lunghezza e come valore Y la metà dell'altezza della singola trave. La misura è stata condotta sulla superficie del pilastro D con esposizione sud-ovest e sulle superfici esposte a nord-ovest per la trave A e sud-est per le travi B e C.

In particolare sul pilastro D si è ottenuto un valore medio dell'indice sclerometrico di 34 e sulle travi A, B e C rispettivamente di 41, 43 e 36 (tabelle B.4 e B.5).

## **3.2.3 TECNICHE ELETTROCHIMICHE**

### MAPPATURA DEL POTENZIALE

La posizione della misura è individuata da un valore X pari alla metà dello spessore del pilastro e come valore Y la metà della zona che intercorre tra una staffa e l'altra. Le misure effettuate per le travi, invece, riportano come valore X la metà della zona che intercorre tra una staffa e l'altra e come valore Y la metà dell'altezza della singola trave (figure A.2÷A.6).

Osservando i valori di potenziale misurati sui pilastri, riportati singolarmente nella tabella B.6, si possono ricavare le informazioni della tabella 3.2, nella quale vengono indicati per ogni elemento i valori minimo, massimo e medio.

ELEMENTO	MIN	MAX	MEDIO
<b>PILASTRO PA</b>	<b>-371</b>	<b>-250</b>	<b>-289</b>
<b>PILASTRO PB</b>	<b>-14</b>	<b>70</b>	<b>31</b>
<b>PILASTRO PC</b>	<b>-72</b>	<b>122</b>	<b>30</b>
<b>PILASTRO PC</b>	<b>-148</b>	<b>50</b>	<b>-51</b>

Tabella 3.2: Valori di potenziale in mV Cu/CuSO<sub>4</sub> dei pilastri sul lato sud-ovest.

Osservando i valori si possono individuare due principali campi di potenziale in cui si trovano i pilastri: il primo intervallo che assume valori piuttosto bassi, compresi tra -371 e -250 mV Cu/CuSO<sub>4</sub>, caratteristico del solo pilastro A che si differenzia dagli altri, ed un secondo intervallo caratterizzato da valori più alti che variano da -148 a 122 mV Cu/CuSO<sub>4</sub>, nel quale ricadono le misure dei pilastri rimanenti.

Per le travi invece si distinguono i valori in base all'esposizione (tabelle B.7, B.8), riportando le informazioni generali nella tabella 3.3. In questo caso si può vedere che per ciascuna di esse, sia per l'esposizione sud-est che per quella nord-ovest, i valori del potenziale sono compresi nello stesso intervallo. In particolare si nota che la trave A è caratterizzata da valori molto bassi di potenziale, come si sono riscontrati anche nel rispettivo pilastro (PA); la trave B invece assume valori piuttosto alti e comunque superiori a -200 mV Cu/CuSO<sub>4</sub>, mentre le travi C e D assumono valori compresi tra -150 e -360 mV Cu/CuSO<sub>4</sub>.

ELEMENTO	SUD-EST			NORD-OVEST		
	MIN	MAX	MEDIO	MIN	MAX	MEDIO
<b>TRAVE TA</b>	<b>-430</b>	<b>-203</b>	<b>-347</b>	<b>-447</b>	<b>-295</b>	<b>-378</b>
<b>TRAVE TB</b>	<b>-137</b>	<b>17</b>	<b>-17</b>	<b>-153</b>	<b>-45</b>	<b>-100</b>
<b>TRAVE TC</b>	<b>-311</b>	<b>-180</b>	<b>-240</b>	<b>-214</b>	<b>-155</b>	<b>-194</b>
<b>TRAVE TD</b>	<b>-353</b>	<b>-240</b>	<b>-276</b>	<b>-317</b>	<b>-210</b>	<b>-266</b>

Tabella 3.3: Valori di potenziale in mV Cu/CuSO<sub>4</sub> delle travi sul lato sud-est e nord-ovest.

### RESISTIVITA' ELETTRICA DEL CALCESTRUZZO

I punti in cui sono state prese le misure sono individuati da un valore X pari alla metà dello spessore del pilastro e ad un valore Y pari alla metà della zona che intercorre tra una staffa e l'altra; per le travi invece la misura è stata effettuata ad un valore X pari alla metà della zona che intercorre tra una staffa e l'altra e ad un valore Y pari alla metà dell'altezza della singola trave (figure A.2÷A.6). I singoli valori di conduttanza e resistività sono riportati in Appendice B nelle tabelle B.9÷B.12.

ELEMENTO	MIN	MAX	MEDIO
<b>PILASTRO PB</b>	<b>6559</b>	<b>21862</b>	<b>12761</b>
<b>PILASTRO PD</b>	<b>890</b>	<b>4615</b>	<b>2503</b>
<b>TRAVE TA</b>	<b>811</b>	<b>2136</b>	<b>1425</b>
<b>TRAVE TB</b>	<b>1365</b>	<b>6171</b>	<b>3526</b>
<b>TRAVE TC</b>	<b>1134</b>	<b>3283</b>	<b>2167</b>
<b>TRAVE TD</b>	<b>1884</b>	<b>4500</b>	<b>3316</b>

Tabella 3.4: Valori di resistività in  $\Omega\text{m}$  dei pilastri e delle travi misurata tra faccia nord-ovest e faccia sud-est.

Dai valori riassunti nella tabella 3.4 si può notare che per il pilastro B la resistività varia da 6500 a 21900  $\Omega\text{m}$ , mentre nel pilastro D risulta inferiore e compresa tra 890 e 4650  $\Omega\text{m}$ .

Con riferimento alle travi, si nota che la trave A assume dei valori di resistività compresi tra 800 e 2100  $\Omega\text{m}$ , mentre nella trave B si è riscontrata una resistività più elevata, che si accentua in alcune zone, compresa tra 1300 e 6200  $\Omega\text{m}$ . Per quanto riguarda le travi C e D, sulle quali non è stato possibile effettuare le misure su tutta la lunghezza, si sono registrati dei valori compresi tra 1100 e 4500  $\Omega\text{m}$ , che per la trave D risultano crescenti dall'estremità vicino al pilastro fino all'ultimo punto di misura.

### 3.2.4 CAMPIONI

Nella zona delle *terme centrali* sono stati raccolti un buon numero di provini, sia prelevando i campioni di polvere dai vari elementi sia raccogliendo dei frammenti di calcestruzzo che si sono distaccati dalla struttura a causa della corrosione delle armature. In particolare, dov'è stato possibile, si è cercato di prelevare i campioni in punti diversi dei pilastri e delle travi, praticando in queste ultime anche un foro passante (solo per le travi A e D).

Nei rilievi geometrici, riportati in Appendice A nelle figure A.2÷A.7, sono stati indicati i punti di prelievo dei diversi campioni con la rispettiva sigla che ne descrive le caratteristiche: per esempio la sigla 1-PA-3(1) indica che il campione è stato prelevato nella zona 1, sul pilastro A e rappresenta il terzo campione prelevato riferito all'elemento preso in considerazione. Se il campione prelevato è sotto forma di polvere di calcestruzzo tra parentesi viene indicato il numero progressivo dei prelievi alle diverse profondità che costituiscono il campione stesso, mentre se il campione raccolto è un frammento si trova la lettera "f" (tabella 3.5).

In particolare, osservando le figure B.2÷B.5 riportate in Appendice B, si può notare che tutti i campioni di frammento prelevati derivano da zone in prossimità dell'armatura, che risulta visivamente soggetta ad un processo di corrosione.

Infine in questa zona sono stati prelevati anche dei ferri d'armatura e i relativi prodotti di corrosione con lo scopo di fornire altri elementi utili per studiare i danni subiti dalla struttura. In figura 3.9a viene riportato un pezzo della staffa del pilastro C (campione 1-PC-Fe-1) che, come si può notare, risulta particolarmente danneggiata dalla corrosione che ha assottigliato la sezione della barra fino ad annullarla. In figura 3.9b invece viene riportata l'immagine in cui sono stati raccolti i prodotti di corrosione relativi al pilastro A (campione 1-PA-Fe-1).

CAMPIONE	TIPO	ELEMENTO	ESPOSIZIONE	PROFONDITA' (mm)
1-PA-3(1)	polvere	Pilastro A	sud-est	10
1-PA-4(f)	frammento	Pilastro A	sud-est	-
1-PB-1(1)	polvere	Pilastro B	sud-ovest	65
1-PB-2(5)	polvere	Pilastro B	sud-ovest	114
1-PB-3(f)	frammento	Pilastro B	sud	-
1-PB-4(f)	frammento	Pilastro B	sud-ovest	-
1-PD-1(4)	polvere	Pilastro D	sud-ovest	85
1-PD-2(f)	frammento	Pilastro D	est	-
1-TA-1(10)	polvere	Trave A	sud-est	205
1-TA-2(f)	frammento	Trave A	nord-ovest	-
1-TA-3(4)	polvere	Trave A	sud-est	83
1-TC-1(f)	frammento	Trave C	sud-est	-
1-TD-1(10)	polvere	Trave D	nord-ovest	200
1-TD-2(f)	frammento	Trave D	sud-est	-

Tabella 3.5: Descrizione dei campioni prelevati nella zona 1.



a



b

Figura 3.9a: Particolare staffa del pilastro C in avanzato stato di corrosione, campione 1-PC-Fe-1;  
b: Prelievo dei prodotti di corrosione dal pilastro A, campione 1-PA-Fe-1.

### PROFONDITA' DI CARBONATAZIONE

Sul pilastro B si sono prelevati quattro campioni, due sotto forma di polvere di calcestruzzo e due in frammenti. Sul campione 1-PB-2(5), prelevato sul lato sud-ovest e costituito da cinque prelievi, la prova alla fenolftaleina ha rilevato una profondità di carbonatazione pari a 20 mm (figura B.7). In seguito, dalla prova effettuata anche sulle superfici fresche di rottura dei frammenti, è stato riscontrato che entrambi i campioni risultano carbonatati e presentano sulla



superficie di distacco i prodotti di corrosione delle armature (figura B.8). Questo può essere spiegato dal fatto che le staffe, essendo più esterne, vengono raggiunte prima dall'azione depassivante della carbonatazione e pertanto gli spigoli sono soggetti ad essere espulsi per primi.

Sul pilastro D è stato effettuato il prelievo di polvere del campione 1-PD-1(4) sul lato sud-ovest raggiungendo la profondità di 85 mm ed è stato raccolto il frammento 1-PD-2(f) che deriva dallo spigolo interno esposto ad est. Dalla prova è stato riscontrato che il campione 1-PD-1(4) risulta carbonatato fino alla profondità di 65 mm, e le superfici fresche di rottura del frammento raccolto sono risultate carbonatate (figure B.9 e B.10).

Sulla trave A sono stati eseguiti due prelievi di polvere identificati rispettivamente con 1-TA-1(10) e 1-TA-3(4). Il campione 1-TA-1(10), che è passante da parte a parte della trave, è costituito da 10 prelievi a diverse profondità, identificate dalla lettera *a* alla lettera *l*, che sottoposti alla prova hanno dato il risultato riportato in figura 3.10.

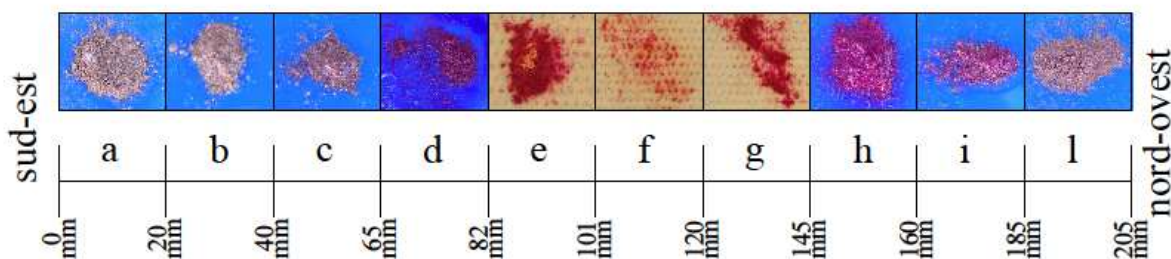


Figura 3.10: Prova alla fenolftaleina effettuata sui 10 prelievi di polvere di calcestruzzo del campione 1-TA-1(a-l).

Il calcestruzzo risulta carbonatato fino alla profondità di 65 mm; all'aumentare della profondità la polvere assume un colore rosa, caratteristica di un calcestruzzo alcalino che risulta compreso tra 65 e 185 mm; infine risulta ancora carbonatato da 185 a 205 mm (lato nord-ovest). Quindi, a partire dal lato sud-est, la trave risulta carbonatata fino ad una profondità di 65 mm, mentre partendo da nord-ovest fino a 20 mm (205-185 mm).

Nel campione 1-TA-3(4), prelevato sempre sul lato sud-est della trave A ma in un altro punto, si è rilevata una profondità di carbonatazione pari a 40mm (figura B.11).

Anche sulla trave D è stato realizzato un foro passante partendo in questo caso dal lato nord-ovest. In figura 3.11 viene riportato l'esito della prova alla fenolftaleina effettuata su 9 dei 10 prelievi del campione 1-TD-1(10). Come si può notare sull'ultimo prelievo di questo campione non è stata effettuata la prova in quanto la polvere che si è riusciti a prelevare è risultata inferiore al minimo quantitativo richiesto per l'esecuzione dell'analisi.

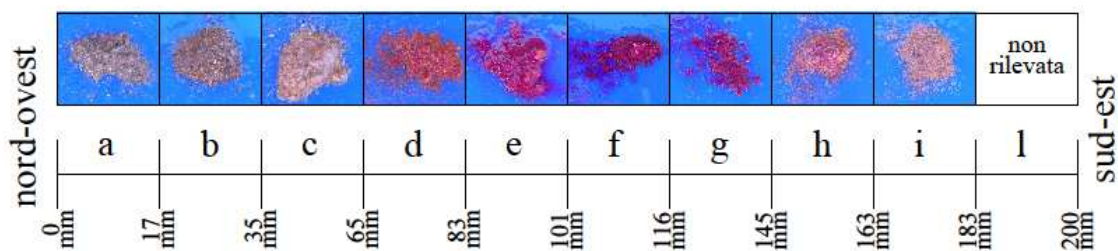


Figura 3.11: Prova alla fenolftaleina effettuata sui 9 dei 10 prelievi di polvere di calcestruzzo del campione 1-TD-1(a-i).

La trave D risulta quindi carbonatata sulla faccia nord-ovest fino ad una profondità di 83 mm; tra 83 e 145 mm il calcestruzzo risulta alcalino ed infine ancora carbonatato da 145 a 183 mm di profondità. Dai risultati ottenuti però si può supporre che anche l'ultimo prelievo, che arriva fino a 200 mm di profondità, sia carbonatato e pertanto la profondità di carbonatazione sulla faccia sud-est è pari a 55 mm (200-145 mm).

La prova alla fenolftaleina effettuata sulla superficie di rottura del frammento 1-TD-2(f), staccatosi dalla parte opposta rispetto a dov'è iniziato il prelievo, conferma l'ipotesi dello stato di carbonatazione dell'ultimo prelievo del campione 1-TD-1 (figura B.12).

I risultati della prova alla fenolftaleina effettuata sui diversi campioni sono riassunti nella tabella 3.6. Durante la prova alla fenolftaleina, i campioni di polvere di calcestruzzo che hanno assunto una colorazione rosa meno intenso sono stati considerati alcalini, pertanto nel primo prelievo risultato alcalino si presume che sia compreso il valore effettivo della profondità di carbonatazione.

CAMPIONE	TIPO	ELEMENTO	ESPOSIZIONE	PROFONDITA' (mm)		RISULTATO PROVA FENOLFTALEINA
				INIZIO	FINE	
1-PA-3(a)	polvere	Pilastro A	sud-est	0	10	CARBONATATO
1-PB-1(a)	polvere	Pilastro B	sud-ovest	0	65	ALCALINO
1-PB-2(a)	polvere	Pilastro B	sud-ovest	0	20	CARBONATATO
1-PB-2(b)	polvere	Pilastro B	sud-ovest	20	41	ALCALINO
1-PB-2(c)	polvere	Pilastro B	sud-ovest	41	64	ALCALINO
1-PB-2(d)	polvere	Pilastro B	sud-ovest	64	84	ALCALINO
1-PB-2(e)	polvere	Pilastro B	sud-ovest	84	114	ALCALINO
1-PB-3(f)	frammento	Pilastro B	sud	-	-	CARBONATATO
1-PB-4(f)	frammento	Pilastro B	sud-ovest	-	-	CARBONATATO
1-PD-1(a)	polvere	Pilastro D	sud-ovest	0	18	CARBONATATO
1-PD-1(b)	polvere	Pilastro D	sud-ovest	18	41	CARBONATATO
1-PD-1(c)	polvere	Pilastro D	sud-ovest	41	65	CARBONATATO
1-PD-1(d)	polvere	Pilastro D	sud-ovest	65	85	ALCALINO
1-PD-2(f)	frammento	Pilastro D	est	-	-	CARBONATATO
1-TA-1(a)	polvere	Trave A	sud-est	0	20	CARBONATATO
1-TA-1(b)	polvere	Trave A	sud-est	20	40	CARBONATATO
1-TA-1(c)	polvere	Trave A	sud-est	40	65	CARBONATATO
1-TA-1(d)	polvere	Trave A	sud-est	65	82	ALCALINO
1-TA-1(e)	polvere	Trave A	sud-est	82	101	ALCALINO
1-TA-1(f)	polvere	Trave A	sud-est	101	120	ALCALINO
1-TA-1(g)	polvere	Trave A	sud-est	120	145	ALCALINO
1-TA-1(h)	polvere	Trave A	sud-est	145	160	ALCALINO
1-TA-1(i)	polvere	Trave A	sud-est	160	185	ALCALINO
1-TA-1(l)	polvere	Trave A	sud-est	185	205	CARBONATATO
1-TA-3(a)	polvere	Trave A	sud-est	0	16	CARBONATATO
1-TA-3(b)	polvere	Trave A	sud-est	16	40	CARBONATATO
1-TA-3(c)	polvere	Trave A	sud-est	40	62	ALCALINO
1-TA-3(d)	polvere	Trave A	sud-est	62	83	ALCALINO
1-TD-1(a)	polvere	Trave D	nord-ovest	0	17	CARBONATATO
1-TD-1(b)	polvere	Trave D	nord-ovest	17	35	CARBONATATO
1-TD-1(c)	polvere	Trave D	nord-ovest	35	65	CARBONATATO
1-TD-1(d)	polvere	Trave D	nord-ovest	65	83	CARBONATATO
1-TD-1(e)	polvere	Trave D	nord-ovest	83	101	ALCALINO
1-TD-1(f)	polvere	Trave D	nord-ovest	101	116	ALCALINO
1-TD-1(g)	polvere	Trave D	nord-ovest	116	145	ALCALINO
1-TD-1(h)	polvere	Trave D	nord-ovest	145	163	CARBONATATO
1-TD-1(i)	polvere	Trave D	nord-ovest	163	183	CARBONATATO
1-TD-1(l)	polvere	Trave D	nord-ovest	183	200	-
1-TD-2(f)	frammento	Trave D	sud-est	-	-	CARBONATATO

Tabella 3.6: Risultati della prova alla fenolftaleina effettuata sui diversi campioni della zona 1.

### 3.3 RISULTATI DEL TEATRO – ZONA 2

L'area del *teatro* romano, identificata come zona 2, è servita da due entrate a forma di volta, una disposta nella parte sud e l'altra nella parte nord del complesso (figura 3.12).



Figura 3.12: Vista aerea del *teatro* - zona 2 con indicata l'entrata posta a nord [17].

Il nostro lavoro si è concentrato nell'entrata posta a nord del teatro, rappresentata geometricamente dai rilievi riportati nelle figure A.8÷A.11. Dai prospetti si nota che la volta ha uno spessore di 30 cm, un'arcata di diametro pari a 195 cm ed un'altezza che varia da 325 a 263 cm rispettivamente all'esterno e all'interno del teatro.

#### 3.3.1 OSSERVAZIONE VISIVA

Durante l'ispezione visiva sul muro che delimita l'entrata della volta posta a nord del *teatro* si sono osservati degli inserti di ferro localizzati in alcuni punti, che fuoriescono dalla superficie del calcestruzzo (figura B.13÷B.15). Oltre a questi ferri però non si sono rilevate delle vere e proprie armature e pertanto in questa zona non sono state effettuate le misure dello spessore di copriferro. Come si può vedere dalla figura 3.13 questi ferri, presenti nella parte esposta ad est e a nord del muro, sono interessati da un processo di corrosione e sulla superficie del calcestruzzo sono ben visibili anche delle efflorescenze di colore bianco.



Figura 3.13: Particolare della corrosione degli inserti metallici indicati in rosso e delle efflorescenze bianche sulla superficie del calcestruzzo indicate in blu.

### 3.3.2 TECNICHE ELETTROCHIMICHE

#### MAPPATURA DEL POTENZIALE

Poiché le parti in calcestruzzo non sono armate, la misura del potenziale nella zona 2 del *teatro* è stata effettuata in alcuni punti particolari sul lato nord del muro dove spuntano alcuni inserti metallici. Nel rilievo geometrico riportato in figura A.12 viene definito il sistema di riferimento utilizzato per individuare i punti nei quali sono state prese le misure. La tabella 3.7 riporta i valori dei potenziali ottenuti che risultano compresi tra -255 e -490 mV vs Cu/CuSO<sub>4</sub>, con un valore medio pari a -349 mV Cu/CuSO<sub>4</sub>.

ELEMENTO	MURO	Y (mm)		Y (mm)		Y (mm)		Y (mm)		Y (mm)
posizione	<b>A</b>	860	<b>B</b>	840	<b>C</b>	840	<b>D</b>	450	<b>E</b>	340
X (mm)	630	<b>-320</b>	490	<b>-255</b>	20	<b>-324</b>	600	<b>-490</b>	70	<b>-356</b>

Tabella 3.7: Posizione e valori del potenziale in mV/CSE del muro lato nord.

#### RESISTIVITA' ELETTRICA DEL CALCESTRUZZO

Nei rilievi geometrici riportati in Appendice A nelle figure A.13÷A.16 si è definito il sistema di riferimento utilizzato per individuare i vari punti nei quali sono state effettuate le misure. In particolare nel rilievo geometrico di figura A.13, che rappresenta il prospetto del lato nord dell'entrata del *teatro*, sono stati evidenziati due sistemi di riferimento: il primo x-y utilizzato per individuare i punti A-C e D-E, nei quali è stata misurata la conduttanza con il metodo indiretto; il secondo x'-y' utilizzato per individuare i punti A-B, C-D, E-F, G-H nei quali è stata misurata la conduttanza con metodo indiretto ponendo le piastre ad una distanza di circa

60 cm rappresentata dal segmento rosso e i punti 1-2, 3-4, 5-6 nei quali la conduttanza è stata misurata con metodo diretto, ponendo le piastre tra lo spessore della volta pari a 30 cm, indicato dal segmento verde.

Dai valori ottenuti si è osservato che la resistività misurata sulle due superfici del muro risulta inferiore rispetto a quella misurata sulla volta. In particolare sul muro si è registrata una resistività compresa tra 22 e 47  $\Omega\text{m}$ , mentre sulla volta la resistività varia da 235 a 900  $\Omega\text{m}$  (tabella B.17).

Nel rilievo geometrico di figura A.14, che rappresenta, il prospetto del lato sud dell'entrata del *teatro*, sono stati evidenziati dei segmenti rossi e verdi che individuano rispettivamente i punti nei quali si è misurata la conduttanza attraverso lo spessore della volta con metodo diretto e sullo spessore della volta con metodo indiretto.

In questa zona i valori della resistività variano da 251 a 675  $\Omega\text{m}$  e risultano pertanto molto simili a quelli misurati sulla volta esposta a nord (tabella B.18).

Nel rilievo geometrico di figura A.15 sul muro esposto ad ovest che costeggia la volta si sono indicati i punti riferiti al sistema x-y dove sono state posizionate le piastre, per la misura indiretta della conduttanza, ad una distanza di circa 60 cm.

In questo caso si può notare che la resistività assume dei valori crescenti dalla posizione R-S alla posizione L-M, variando da 109 a 318  $\Omega\text{m}$  (tabella B.19).

Nell'ultimo rilievo geometrico di figura A.16, che riporta il prospetto del lato est dell'entrata del *teatro*, sono stati evidenziati tre sistemi di riferimento rispetto ai quali è stata rilevata la conduttanza con metodo indiretto, ponendo le piastre ad una distanza di circa 60 cm. In particolare le misure effettuate nei punti indicati con le lettere E-F, G-H, F-L, H-M, rispetto al sistema x-y, si riferiscono alla volta; mentre le misure effettuate nei punti A-B, C-D ed N-O, P-Q, R-S, K-J, rispetto al sistema x'-y' e x''-y'', si riferiscono al muro.

Dai valori ottenuti si evidenziano tre zone particolari: sulla superficie della volta e sul muro adiacente la resistività varia da 235 a 900  $\Omega\text{m}$ ; nella posizione K-J si è registrato un valore superiore ai 1000  $\Omega\text{m}$ , mentre nei punti N-O, P-Q, ed R-S la resistività risulta decisamente inferiore, compresa tra 20 e 23  $\Omega\text{m}$  (tabella B.20).

### 3.3.3 CAMPIONI

La tecnica utilizzata per il prelievo è la stessa descritta in precedenza. In particolare nei rilievi geometrici riportati nelle figure A.17÷A.19 vengono indicati i punti dove sono stati prelevati i diversi campioni con la relativa sigla. La tabella 3.8 riassume le caratteristiche dei campioni prelevati.

CAMPIONE	TIPO	ELEMENTO	ESPOSIZIONE	PROFONDITA' (mm)
2-VE-1(4)	polvere	Volta	nord	84
2-VE-2(4)	polvere	Muro	ovest	84
2-VE-3(f)	frammento	Muro	nord	-
2-VE-4(4)	polvere	Muro	nord	80
2-VE-5(5)	polvere	Muro	est	103
2-VE-6(4)	polvere	Volta	est	118
2-VE-7(f)	frammento	Volta	nord	-

Tabella 3.8: Descrizione dei campioni prelevati nella zona 2.

### PROFONDITA' DI CARBONATAZIONE

I singoli risultati della prova alla fenolftaleina effettuata in situ sui diversi campioni sono riportati nelle figure B.21÷B.25.

Dai risultati, riassunti nella tabella 3.9, si possono dedurre due profondità di carbonatazione abbastanza simili: per i campioni 2-VE-1 e 2-VE-6 si è verificata una profondità di carbonatazione che varia tra 40 mm e 45 mm, mentre per gli altri campioni la profondità aumenta fino a raggiungere un massimo di 64 mm. Inoltre si può osservare che l'esito di questa misura non è stato influenzato dalla diversa esposizione dei campioni prelevati.

CAMPIONE	TIPO	ELEMENTO	ESPOSIZIONE	PROFONDITA' (mm)		RISULTATO PROVA FENOLFTALEINA
				INIZIO	FINE	
2-VE-1(a)	polvere	Volta	nord	0	24	CARBONATATO
2-VE-1(b)	polvere	Volta	nord	24	45	CARBONATATO
2-VE-1(c)	polvere	Volta	nord	45	65	ALCALINO
2-VE-1(d)	polvere	Volta	nord	65	84	ALCALINO
2-VE-2(a)	polvere	Muro	ovest	0	18	CARBONATATO
2-VE-2(b)	polvere	Muro	ovest	18	39	CARBONATATO
2-VE-2(c)	polvere	Muro	ovest	39	64	CARBONATATO
2-VE-2(d)	polvere	Muro	ovest	64	84	ALCALINO
2-VE-4(a)	polvere	Muro	nord	0	19	CARBONATATO
2-VE-4(b)	polvere	Muro	nord	19	40	CARBONATATO
2-VE-4(c)	polvere	Muro	nord	40	59	CARBONATATO
2-VE-4(d)	polvere	Muro	nord	59	80	ALCALINO
2-VE-5(a)	polvere	Muro	est	0	19	CARBONATATO
2-VE-5(b)	polvere	Muro	est	19	42	CARBONATATO
2-VE-5(c)	polvere	Muro	est	42	62	CARBONATATO
2-VE-5(d)	polvere	Muro	est	62	80	ALCALINO
2-VE-5(e)	polvere	Muro	est	80	103	ALCALINO
2-VE-6(a)	polvere	Volta	est	0	19	CARBONATATO
2-VE-6(b)	polvere	Volta	est	19	40	CARBONATATO
2-VE-6(c)	polvere	Volta	est	40	81	ALCALINO
2-VE-6(d)	polvere	Volta	est	81	118	ALCALINO

Tabella 3.9: Risultati della prova alla fenolftaleina effettuata sui diversi campioni della zona 2.

### 3.4 RISULTATI DELLE TERME A MARE: *FRIGIDARIUM* – ZONA 3

Uno degli ambienti caratteristici della zona delle *terme a mare* è rappresentato dal *frigidarium*, identificato come zona 3. In questo caso la nostra attenzione si è posta sull'entrata a forma di architrave che ne delimita l'ingresso (figura 3.14).

Dal prospetto, riportato in figura A.20, si può notare che l'entrata presenta una larghezza di 153 cm ed un'altezza di 244 cm, delimitata superiormente da un architrave con uno spessore di 44 cm.



Figura 3.14: Vista sud dell'architrave delle *terme a mare frigidarium* – zona 3.

#### 3.4.1 OSSERVAZIONE VISIVA

Nella zona 3 delle *terme a mare* si sono riscontrate le stesse forme di degrado viste nella zona 2 del *teatro*, come la presenza di fili di ferro che fuoriescono dalla superficie del calcestruzzo interessati da un processo di corrosione e delle efflorescenze bianche ben visibili sulla superficie del calcestruzzo sul lato sud e nell'intradosso dell'architrave (figura 3.15). Anche in questo caso non state effettuate le misure dello spessore di copriferro in quanto, nelle parti in calcestruzzo esaminate, non si sono riscontrate armature.





*a* *b*  
 Figura 3.15: *a*: Particolare degli inserti metallici che fuoriescono dalla superficie del calcestruzzo; *b*: particolare delle efflorescenze bianche presenti sulla superficie del calcestruzzo nell'intradosso dell'architrave

### 3.4.2 TECNICHE ELETTROCHIMICHE

#### RESISTIVITA' ELETTRICA DEL CALCESTRUZZO

Nei rilievi geometrici, riportati in Appendice A nelle figure A.21÷A.23, si sono indicati i punti, con relativo sistema di riferimento, dove è stata effettuata la misura della conduttanza eseguita sempre con metodo indiretto ponendo le piastre ad una distanza di circa 60 cm, evidenziata nei diversi disegni con un segmento rosso.

Dai valori della tabella 3.10 possiamo osservare che la resistività misurata sul lato nord cresce all'aumentare della distanza dal piano di riferimento ed in generale risulta inferiore a 500  $\Omega\text{m}$ , mentre sul lato sud ed ovest si è registrata una resistività più elevata, compresa tra 386 e 771  $\Omega\text{m}$ .

ELEMENTO	MURO	Y (mm)		Y (mm)		Y (mm)		Y (mm)		Y (mm)
posizione	<b>1-2</b>	400	<b>3-4</b>	800	<b>5-6</b>	1200	<b>7-8</b>	1600	<b>9-10</b>	1900
X (mm)	550	<b>230</b>	550	<b>372</b>	550	<b>443</b>	550	<b>478</b>	550	<b>486</b>

*a*

ELEMENTO	MURO	Y (mm)		Y (mm)		Y (mm)		Y (mm)
posizione	<b>1-2</b>	800	<b>3-4</b>	1200	<b>5-6</b>	1600	<b>7-8</b>	1900
X (mm)	475	<b>771</b>	475	<b>386</b>	475	<b>635</b>	475	<b>771</b>

*b*

ELEMENTO	MURO	Y (mm)		Y (mm)		Y (mm)
posizione	<b>1-2</b>	1200	<b>3-4</b>	1600	<b>5-6</b>	2000
X (mm)	400	<b>593</b>	400	<b>505</b>	400	<b>684</b>

*c*

Tabella 3.10: Posizione e valori della resistività elettrica in  $\Omega\text{m}$  misurata sul muro, *a*: lato nord; *b*: lato sud; *c*: lato ovest.

### 3.4.3 CAMPIONI

I punti di prelievo dei diversi campioni con la rispettiva sigla sono stati indicati nel rilievo geometrico riportato in figura A.24. La tabella 3.11 mostra le caratteristiche dei campioni prelevati in questa zona.

CAMPIONE	TIPO	ELEMENTO	ESPOSIZIONE	PROFONDITA' (mm)
3-V-1(4)	polvere	Muro	sud	81
3-V-2(4)	polvere	Muro	nord	82
3-V-3(4)	polvere	Muro	ovest	86
3-V-4(f)	frammento	Muro	ovest	-

Tabella 3.11: Descrizione dei campioni prelevati nella zona 3.

#### PROFONDITA' DI CARBONATAZIONE

Sui diversi campioni è stata effettuata la prova alla fenolftaleina per verificare la profondità di carbonatazione. L'esito della prova, riportato singolarmente in Appendice B nelle figure B.31÷B.33, è stato riassunto nella tabella 3.12.

In particolare si è potuto osservare che, indipendentemente dalla diversa esposizione, tutti i campioni prelevati risultano carbonatati fino a una distanza di 20/21 mm dalla superficie esterna del calcestruzzo, che corrisponde alla profondità raggiunta dai primi prelievi.

CAMPIONE	TIPO	ELEMENTO	ESPOSIZIONE	PROFONDITA' (mm)		RISULTATO PROVA FENOLFTALEINA
				INIZIO	FINE	
3-V-1(a)	polvere	Muro	sud	0	20	CARBONATATO
3-V-1(b)	polvere	Muro	sud	20	43	ALCALINO
3-V-1(c)	polvere	Muro	sud	43	62	ALCALINO
3-V-1(d)	polvere	Muro	sud	62	81	ALCALINO
3-V-2(a)	polvere	Muro	nord	0	21	CARBONATATO
3-V-2(b)	polvere	Muro	nord	21	44	ALCALINO
3-V-2(c)	polvere	Muro	nord	44	63	ALCALINO
3-V-2(d)	polvere	Muro	nord	63	82	ALCALINO
3-V-3(a)	polvere	Muro	ovest	0	20	CARBONATATO
3-V-3(b)	polvere	Muro	ovest	20	42	ALCALINO
3-V-3(c)	polvere	Muro	ovest	42	60	ALCALINO
3-V-3(d)	polvere	Muro	ovest	60	86	ALCALINO

Tabella 3.12: Risultati della prova alla fenolftaleina effettuata sui diversi campioni della zona 3.

### 3.5 RISULTATI DELLE TERME A MARE: *CALIDARIUM* – ZONA 4

L'altro ambiente preso in considerazione, caratteristico delle *terme a mare* e denominato zona 4, è il *calidarium* (figura 3.16).



Figura 3.16: Vista del lato ovest del *calidarium* – zona 4, sullo sfondo il corpo est e a sinistra il corpo nord.

In quest'area sono presenti due blocchi costituiti da pilastrini con relativa soletta superiore. Il corpo posto a est dell'ambiente è costituito da una serie di pilastrini posti parallelamente uno dietro l'altro. Il nostro lavoro si è concentrato solo sui primi 7 pilastrini di calcestruzzo che si trovano sul bordo esterno del corpo identificati dalla A alla G. Come si può vedere dal rilievo geometrico di figura A.25, riportato in Appendice A, questi elementi presentano una dimensione che varia da 23 a 24,5 cm ed un'altezza media pari a circa 78 cm. La soletta in calcestruzzo armato posta al di sopra dei pilastrini presenta una forma irregolare, con uno spessore medio di 52 cm.

Il corpo nord invece visto da sud è costituito da quattro file di pilastrini sopra i quali si trova una soletta in calcestruzzo armato spessa 9 cm che occupa un'area rettangolare di dimensioni 220x171 cm. In questo caso sono stati presi in considerazione solo i pilastri in calcestruzzo posti all'esterno sul contorno ovest, sud ed est della soletta, identificati dalla A alla H (figure A.26, A.27). Come si può notare dai rilievi riportati i pilastri hanno una dimensione pari a 23/24 cm ed in particolare i pilastri rivolti sul lato ovest ed est presentano un'altezza che varia da 71 a 94 cm dovuta al fatto che il piano è inclinato, mentre quelli esposti a sud hanno un'altezza media di 94 cm.

### 3.5.1 OSSERVAZIONE VISIVA

Durante l'ispezione di questa zona, in entrambi i corpi, si è osservato che la soletta presenta delle fessure in corrispondenza della posizione dei ferri d'armatura a causa della loro corrosione (figura 3.17). L'avanzato stato di corrosione dei ferri d'armatura è chiaramente deducibile anche dalla figura 3.18, che riporta la superficie di distacco di un frammento della soletta del corpo nord, dove sono ben visibili i prodotti di corrosione che hanno causato la sua espulsione.



Figura 3.17: Particolare delle fessure presenti nella soletta del corpo nord (a) e del corpo est (b).



Figura 3.18: Particolare della superficie di distacco di un frammento del corpo nord sul quale sono presenti i prodotti di corrosione lasciati dall'armatura.

### 3.5.2 TECNICHE ELETTROCHIMICHE

#### MAPPATURA DEL POTENZIALE

Le figure A.28 e A-29 riportano il sistema di riferimento XY, avente l'origine nello spigolo in basso a sinistra di ogni pilastro, per individuare i punti nei quali è stata effettuata la misura. Il

potenziale sulla faccia del pilastro è stato misurato in posizione centrale (X pari alla metà del lato del pilastro) ad un'altezza Y pari a quella di ogni singolo pilastro.

Dai risultati ottenuti si può notare che il potenziale misurato nei pilastri del corpo est e nord presenta dei valori omogenei compresi tra -134 e -294 mV Cu/CuSO<sub>4</sub> (tabelle B.22 e B.23).

### RESISTIVITA' ELETTRICA DEL CALCESTRUZZO

Questa misura è stata effettuata con metodo diretto attraverso lo spessore dei pilastri, sia sul corpo nord che sul corpo est, ponendo le piastre dell'elettrodo sulle facce opposte del pilastro in base alla diversa esposizione. La posizione della misura è data da un valore X pari alla metà dello spessore di ciascun pilastro e da un valore Y pari alla metà della relativa altezza (figure A.28, A.30). I valori della conduttanza e della resistività elettrica del calcestruzzo del corpo nord e del corpo est, quest'ultima misurata considerando una distanza tra le piastre pari allo spessore di ciascun pilastro, vengono riportati in Appendice B nelle tabelle B.24÷B.27.

In particolare si possono individuare tre campi di resistività in cui si trovano i pilastri del corpo nord: nel primo campo ricadono i pilastri A e H che presentano una resistività piuttosto bassa compresa tra 44 e 76 Ωm; per quanto riguarda i pilastri B, D, E e G si sono ottenuti dei valori intermedi che variano da 200 a 759 Ωm, mentre nei pilastri C ed F, posti agli spigoli del corpo nord, si riscontrano dei valori più alti che variano da 843 a 3000 Ωm.

Per quanto riguarda il corpo est la misura della conduttanza è stata eseguita anche con metodo indiretto ponendo le piastre ad una distanza di circa 60 cm sulla faccia orizzontale della soletta esposta ad ovest (figure A.28 e A.29). Osservando i dati si può notare che i pilastri A, B e C registrano un valore di resistività che varia da 101 a 201 Ωm. Nei punti W-Z si è riscontrato un valore di resistività pari a 159 Ωm, che risulta pertanto simile al valore medio dei pilastri. I pilastri D, E, F e G invece presentano una resistività inferiore intorno a 66 Ωm, mentre sullo spessore della soletta, nei punti K-Y, si è registrato un valore più alto pari a 110 Ωm.

### **3.5.3 CAMPIONI**

Nel rilievo geometrico di figura A.31 è stato indicato il punto di prelievo dell'unico campione di polvere che è stato raccolto in questa zona: 4-TE-1(4). Il campione è stato prelevato dal corpo est sulla faccia orizzontale esposta ad ovest della soletta, fino alla profondità di 80 mm.

PROFONDITA' DI CARBONATAZIONE

Il risultato della prova alla fenolftaleina effettuata su tutti e quattro i prelievi di polvere di calcestruzzo che costituiscono il campione in esame è descritto nella tabella 3.13.

CAMPIONE	TIPO	ELEMENTO	ESPOSIZIONE	PROFONDITA' (mm)		RISULTATO PROVA FENOLFTALEINA
				INIZIO	FINE	
4-TE-1(a)	polvere	Soletta	ovest	0	22	CARBONATATO
4-TE-1(b)	polvere	Soletta	ovest	22	43	ALCALINO
4-TE-1(c)	polvere	Soletta	ovest	43	64	ALCALINO
4-TE-1(d)	polvere	Soletta	ovest	64	80	ALCALINO

Tabella 3.13: Risultati della prova alla fenolftaleina effettuata sul campione della zona 4.

Dalla figura 3.19 si può chiaramente vedere che il campione prelevato risulta carbonatato fino alla profondità di 22 mm, e alcalino tra 43 e 80 mm.

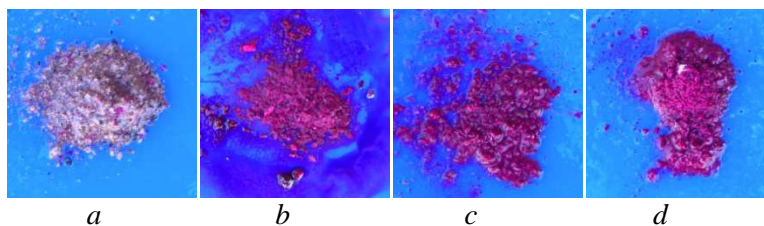


Figura 3.19: Prova alla fenolftaleina sui 4 prelievi di polvere di calcestruzzo del campione 4-TE-1(a-d), corpo est/lato ovest, disposti in profondità crescente.

## **CAPITOLO 4**

### **PROVE DI LABORATORIO**

Durante il sopralluogo nel sito archeologico di Nora si sono prelevati diversi tipi di campioni, con lo scopo di effettuare delle prove sperimentali di laboratorio per approfondire e valutare le varie forme di degrado.

Prima di iniziare ad applicare la metodologia sperimentale si è eseguito l'inventario dei campioni prelevati, che sono stati catalogati e definiti in maniera univoca, indicando la sigla, la loro caratteristica (polvere, frammento) e la massa.

Le tabelle C.1÷C.4, riportate in appendice C, mostrano la catalogazione dei campioni divisi per zona e l'indicazione dei campioni che sono stati sottoposti all'analisi del contenuto di cloruri.

#### **4.1 METODOLOGIA SPERIMENTALE**

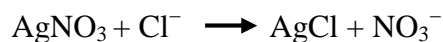
Una volta definiti tutti i campioni si è attuata l'indagine sperimentale di laboratorio, che consiste nell'esecuzione di analisi chimico-fisiche per individuare gli elementi chimici e i composti presenti nel materiale, di analisi microstrutturali per evidenziare la microstruttura del materiale e delle prove fisiche per valutare gli effetti dell'umidità e della temperatura.

In primo luogo sui campioni prelevati sotto forma di polvere è stata effettuata l'analisi del contenuto di cloruri misurata in massa rispetto al calcestruzzo. Si è deciso inoltre di ricavare anche il contenuto di cloruri rispetto al cemento, filtrando la soluzione di alcuni prelievi sui quali è stata ripetuta la titolazione. In seguito su alcuni campioni prelevati sotto forma di frammento sono state effettuate diverse prove fisiche quali le misure del contenuto di umidità, dell'assorbimento e della resistività elettrica. Infine lo studio delle caratteristiche dei campioni si è completato con l'analisi della diffrazione ai raggi X, effettuata su due aggregati prelevati da due differenti campioni per identificare le sostanze cristalline presenti, e l'osservazione di un frammento al microscopio elettronico a scansione ambientale (ESEM) dotato di sonda EDS per l'analisi elementare, in modo da valutarne la composizione chimica [5].

##### **4.1.1 ANALISI DEL CONTENUTO DI CLORURI**

Il contenuto di cloruri presente nel calcestruzzo è stato valutato con l'analisi chimica per via umida mediante titolazione, seguendo le tre fasi che costituiscono la procedura. La prima fase

consiste nella preparazione del materiale: ogni campione sotto forma di polvere di calcestruzzo, che comprende sia la pasta cementizia che gli aggregati, è stato inserito in una macchina frantumatrice e si è macinato fino ad ottenere un passante al setaccio da 125 µm (figura 4.1a); si sono pesati, tarati e identificati con la sigla di ogni rispettivo campione, i beaker (contenitori in vetro da 250 ml) nei quali si sono inseriti all'incirca 3 g di polvere, registrando il peso lordo umido. In seguito i beaker sono stati posti in una stufa a 105°C per 24 ore (figura 4.1b) per essiccare la polvere di calcestruzzo e ricavare la massa secca. Si prosegue con la preparazione della soluzione di prova: nel beaker contenente la polvere si sono aggiunti 50 ml di acqua distillata e 25 ml di acido nitrico (diluito 1:1) che sono stati mescolati con un agitatore di vetro; in seguito il contenitore è stato posto su una piastra elettrica (figura 4.1c) portando la soluzione ad ebollizione per qualche secondo per sciogliere il materiale. La polvere che rimane sul fondo è costituita dai residui degli aggregati silicei che non si sciolgono. Una volta raffreddata a temperatura ambiente, la soluzione è stata travasata in un matraccio graduato da 100 ml ed è stata portata a volume aggiungendo acqua distillata (figura 4.1d); infine ogni soluzione è stata trasferita in un barattolo per soluzioni da 100 ml identificato con la sigla del rispettivo campione. La terza ed ultima fase consiste nella vera e propria titolazione potenziometrica: sono stati prelevati 25 ml di soluzione che sono stati messi in un beaker aggiungendo acqua distillata, in modo tale che la punta sensibile dell'elettrodo a vetro del titolatore sia ben immersa nella soluzione da titolare. Si è infine valutata la concentrazione di cloruri mediante titolazione con una soluzione 0,01 M di argento nitrato (AgNO<sub>3</sub>) che reagisce con i cloruri per formare AgCl:



Quando tutti i cloruri hanno reagito con la soluzione di AgNO<sub>3</sub> aggiunta al campione (espressa in ml) il titolatore fornisce il valore del punto di viraggio (V), grazie al quale si può risalire alla concentrazione di cloruri nella soluzione analizzata. Si calcola il numero di moli di AgNO<sub>3</sub> applicando la seguente formula:

$$\text{moli di AgNO}_3 = V * 0,01 \text{ mol/litro}$$

esprimendo il valore del punto di viraggio in litri. Sapendo che 1 mole di AgNO<sub>3</sub> reagisce con 1 mole di cloruri questo valore corrisponde anche al numero di moli di cloruri presente inizialmente nella soluzione titolata. Si procede con il calcolo della concentrazione di cloruri:

$$[\text{Cl}^-] = [(\text{moli Cl}^-) * (\text{peso atomico Cl}^-)] / \text{volume analizzato}$$

dove il peso atomico dei cloruri è 35,45 g/mole e il volume analizzato è rappresentato dai 25 ml di soluzione prelevata dal campione (espresso in litri). Una volta trovato questo valore,



espresso in grammi/litro, si procede con il calcolo del contenuto di cloruri espresso in percentuale rispetto al calcestruzzo:

$$\text{Cl}^- [\% \text{ massa calcestruzzo}] = [\text{Cl}^-] * V_d / m_{\text{cls}} * 100$$

dove  $V_d$  è il volume in cui è stata disciolta la polvere di calcestruzzo pari a 100 ml e  $m_{\text{cls}}$  è la massa di calcestruzzo disciolta espressa in grammi [5].



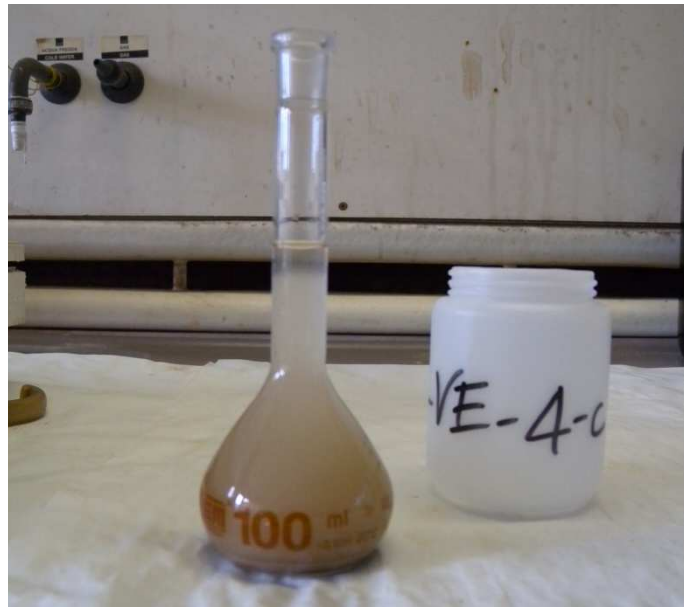
*a*



*b*



*c*



*d*

Figura 4.1: Fasi della procedura della titolazione, *a*: macinazione della polvere di calcestruzzo; *b*: essiccamento della polvere in stufa a 105°C per 24 ore; *c*: scioglimento della polvere in acido citrico; *d*: soluzione inserita nel matraccio.

#### **4.1.1.1 FILTRAZIONE DELLA SOLUZIONE**

In seguito si è deciso di filtrare la soluzione dei campioni per calcolare la concentrazione di cloruri in massa rispetto al cemento e confrontarla con quella riferita al calcestruzzo.

La filtrazione della soluzione è stata eseguita seguendo questa procedura: utilizzando acqua distillata si è pulita la beuta e la piastra filtrante, sopra la quale si è posizionato il filtro di forma circolare e il beaker di contenimento. Si procede versando la soluzione del campione da analizzare nel beaker sovrastante il filtro e con l'impiego di una pompa da vuoto ad acqua collegata alla beuta si è creata una depressione che ha permesso alla soluzione di passare attraverso il filtro, sul quale si è depositato il residuo solido. Al termine dell'operazione si è rimosso il filtro contenente il residuo solido bagnato, che è stato posto in stufa ventilata a 40°C ad asciugare per almeno 48 ore, con l'accortezza di inserire anche un filtro nuovo privo di residuo (detto "bianco"), che è servito come tara di riferimento. Terminato il periodo di essiccamento in stufa si è pesato ogni filtro (compreso quello "bianco" per avere il peso della tara) ottenendo la massa secca di materiale inerte che non si è disciolto durante la titolazione (residuo siliceo) e si è ricalcolato il peso netto secco di materiale, ottenuto sottraendo al peso netto secco totale (pasta cementizia + residuo siliceo) il peso netto del residuo siliceo. Infine per il calcolo del contenuto di cloruri in massa rispetto al cemento si sono utilizzate le stesse formule viste in precedenza inserendo il valore del punto di viraggio ottenuto dalla seconda titolazione e sostituendo alla massa del calcestruzzo quella di cemento appena trovata.

#### **4.1.2 PREPARAZIONE DEI CAMPIONI**

Le prove fisiche descritte nel paragrafo precedente sono state effettuate su alcuni provini ricavati dai campioni prelevati in situ. In particolare sono stati scelti i seguenti campioni: 1-PB-3, 1-PB-4 e 1-PD-2. Ogni campione è stato tagliato utilizzando una sega circolare da banco con lama diamantata lubrificata con acqua durante il funzionamento. Il campione 1-PB-3 è stato diviso in quattro parti e per le prove sono stati usati solo i due pezzi centrali, come si può vedere dalla figura 4.2a, identificati come 1-PB-3-f1 e 1-PB-3-f2 (figura 4.2b); gli altri campioni (1-PB-4 e 1-PD-2) sono stati tagliati in due pezzi, analizzandone solo uno per campione, 1-PB-4-f1 e 1-PD-2-f1 (figura 4.2c-d).

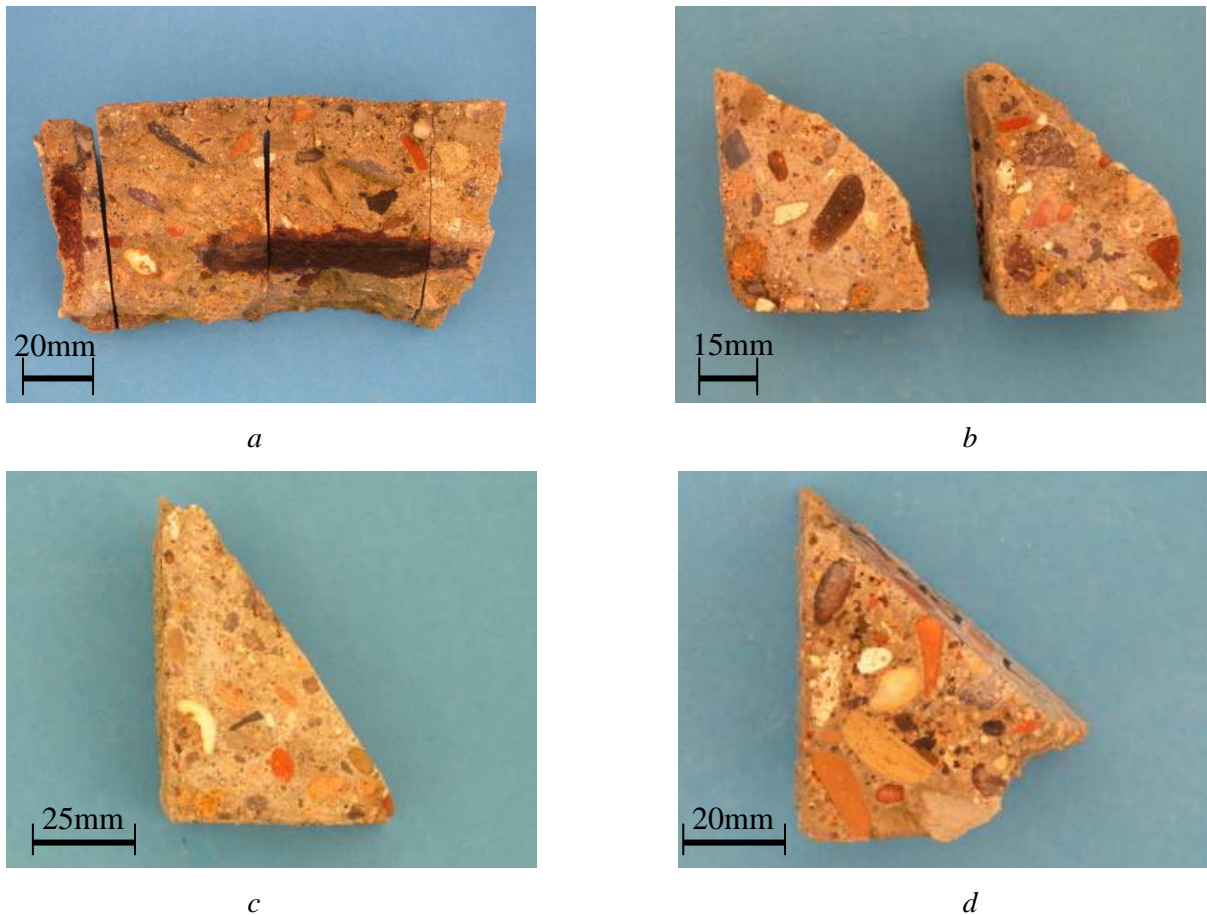


Figura 4.2: *a*: Campione 1-PB-3 con linee di taglio; *b*: superfici di taglio dei provini 1-PB-3-f2 e 1-PB-3-f1; *c*: superficie di taglio del provino 1-PB-4-f1; *d*: superficie di taglio del provino 1-PD-2-f1.

Inoltre sulle superfici fresche di taglio dei frammenti rimasti è stata eseguita la prova alla fenolftaleina. Dalle immagini riportate in figura 4.3a e 4.3b si può vedere come i frammenti di calcestruzzo ricavati dal campione 1-PB-3 e 1-PB-4 sono quasi totalmente carbonatati, ad eccezione di alcune piccole aree centrali che risultano alcaline; mentre nella figura 4.3c si nota che i frammenti di calcestruzzo ricavati dal campione 1-PD-2 sono risultati completamente carbonatati.

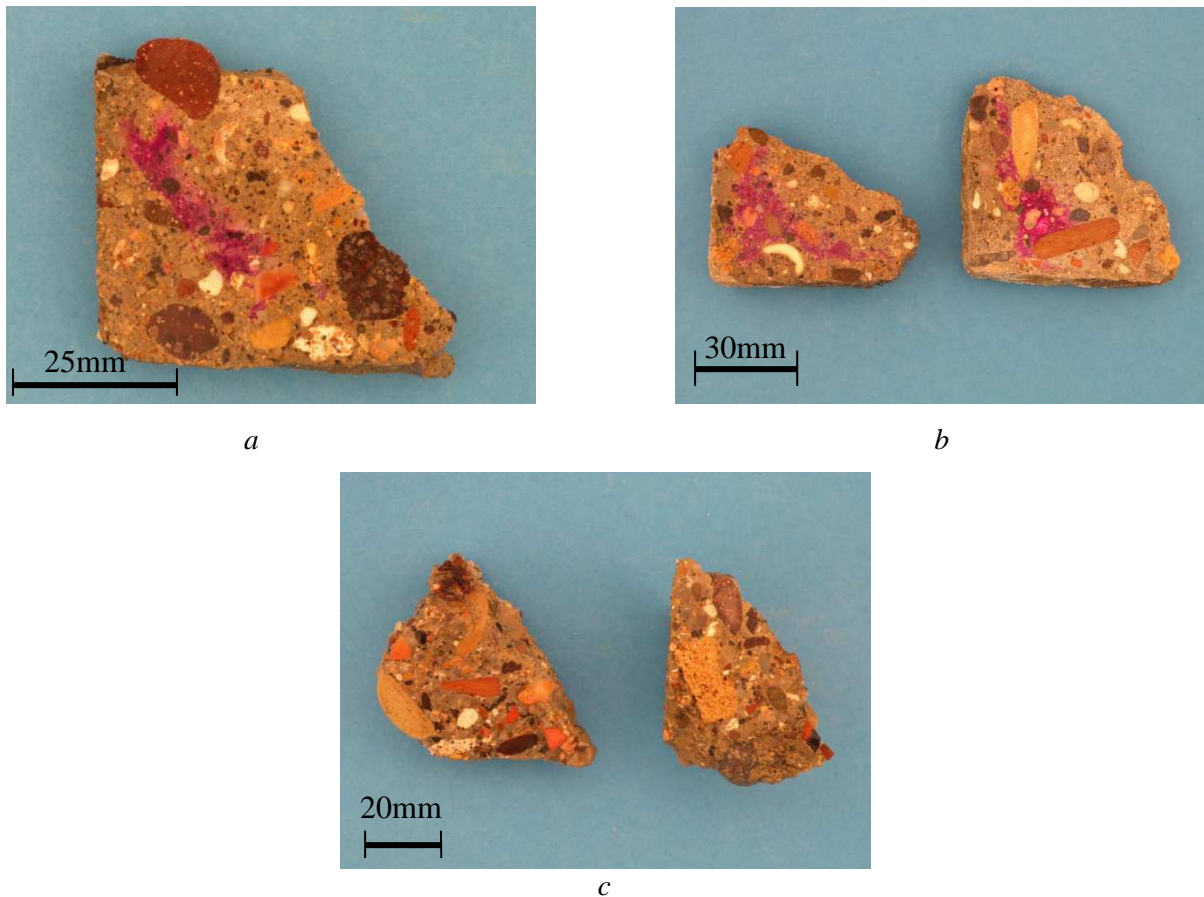


Figura 4.3: Prova alla fenolftaleina sulle superfici di taglio, *a*: frammento del campione 1-PB-3; *b*: frammenti del campione 1-PB-4; *c*: frammenti del campione 1-PD-2.

#### 4.1.2.1 PROVE FISICHE SUI CAMPIONI PRELEVATI

Per studiare le proprietà del calcestruzzo prelevato in sito, su alcuni frammenti sono state eseguite delle prove fisiche che consentono di valutare il comportamento del materiale in funzione ai diversi fenomeni di trasporto degli agenti aggressivi che provengono dall'esterno. Sui provini sono state effettuate misure del contenuto di umidità, dell'assorbimento d'acqua e della resistività elettrica in differenti condizioni di esposizione.

Prima di effettuare la misura dell'assorbimento d'acqua i provini sono stati essiccati in una stufa ventilata a 40°C fino a quando raggiungevano un valore di massa secca costante. Per calcolare il contenuto di umidità in percentuale rispetto alla massa dei singoli provini si è utilizzata la formula seguente:

$$U_m = [(M_{umido} - M_{secco}) / M_{secco}] * 100$$

dove  $U_m$  è il contenuto di umidità riferito alla massa (%),  $M_{umido}$  è la massa del campione umido (kg),  $M_{secco}$  è la massa del campione secco (kg).

Una volta essiccati, i provini sono stati saturati con acqua. Questo processo è stato realizzato ponendo i campioni sottoposti alla prova in un contenitore pieno d'acqua, che è stato chiuso

superiormente e posto in una camera climatica a 20°C, finchè è stato registrato un valore costante di massa. Il contenuto di umidità del materiale saturo, definito assorbimento ( $A_m$ ), rappresenta la massima quantità d'acqua che può essere assorbita dal materiale e si ricava in questo modo:

$$A_m = [(M_{\text{saturo}} - M_{\text{secco}}) / M_{\text{secco}}] * 100$$

dove  $A_m$  è l'assorbimento rispetto alla massa (%),  $M_{\text{saturo}}$  è la massa del campione saturo (kg),  $M_{\text{secco}}$  è la massa del campione secco (kg).

In seguito i provini sono stati posti in camera climatica a 20°C impostando differenti percentuali di umidità relativa decrescente per diversi periodi: 14 giorni a 95% U.R.; 35 giorni a 80% U.R.; 16 giorni a 75% U.R.; 19 giorni a 65% U.R.; 18 giorni a 55% U.R. e 21 giorni a 45% U.R.. Durante questi periodi si è continuato a misurare il contenuto di umidità.

Inoltre per ogni tipo di condizione in cui sono stati esposti i provini si sono effettuate anche le misure della conduttanza per risalire al valore della resistività elettrica del calcestruzzo. I provini sono stati inseriti tra le piastre degli elettrodi ed in questo caso nel calcolo della resistività elettrica, utilizzando sempre la formula vista nel paragrafo 3.1.2.4, è stata inserita l'area trasversale occupata da ogni provino e come distanza tra gli elettrodi lo spessore del singolo provino.

#### **4.1.3 ANALISI MICROSTRUTTURALI**

Si sono eseguite anche delle analisi microstrutturali per ottenere ulteriori informazioni sulle proprietà del calcestruzzo. In particolare la superficie di rottura del frammento 1-PB-3-f3 (figura 4.4), ricavato dal campione 1-PB-3, è stata sottoposta ad osservazione tramite un microscopio elettronico a scansione ambientale (ESEM) che permette ingrandimenti variabili da 10× a 300000× e grazie alla sua notevole profondità di campo si riescono ad osservare superfici rugose anche ad alti ingrandimenti. Sono state scelte due zone distinte di osservazione per cercare di ricavare informazioni utili sia sulla pasta cementizia che sulla natura dell'aggregato. In associazione allo strumento vi è anche lo spettrometro EDS capace di effettuare un'analisi puntuale e contemporaneamente eseguire l'analisi elementare per ricavare gli elementi chimici presenti sulla superficie del campione.

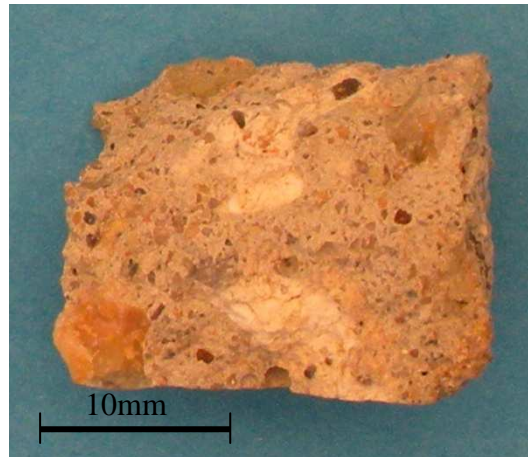


Figura 4.4: Frammento 1-PB-3-f3.

In seguito su due aggregati, ricavati rispettivamente dal terzo campione prelevato dal pilastro B e dal primo campione prelevato dalla trave C, è stata effettuata la diffrazione di raggi X. Per effettuare l'analisi, grazie alla quale si possono identificare qualitativamente e quantitativamente le sostanze cristalline presenti, si utilizza uno strumento chiamato diffrattometro nel quale il campione ridotto in polvere, posto in un'opportuna cuvetta che ruota solidalmente con l'asse del goniometro, viene attraversato da un fascio di raggi X monocromatico. Le intensità dei raggi diffratti dal campione vengono individuate da un rivelatore che li invia ad un registratore dal quale si ricavano i diffrattogrammi, cioè dei diagrammi che riportano in ascissa i valori degli angoli di diffrazione ( $2\vartheta$ ) e in ordinata i relativi conteggi. Il rivelatore ed il campione sono solidali e si muovono con una velocità angolare costante, infatti quando il campione ruota di un angolo  $\vartheta$  il rivelatore ruota di  $2\vartheta$  [5].

## **4.2 RISULTATI DELLE ANALISI DEI CLORURI**

In questo paragrafo si presentano i risultati ottenuti dalla titolazione eseguita sui diversi provini per valutare la percentuale di cloruri presente nel calcestruzzo alle diverse profondità di prelievo.

### ZONA 1

Per quanto riguarda la zona 1 delle *terme centrali*, nella quale sono stati raccolti diversi campioni, si sono ottenuti i valori riportati nella tabella 4.1.

Nome campione	Peso netto umido (g)	Peso netto secco (g)	Titolante (mL)	Cl <sup>-</sup> (ppm)	Cl <sup>-</sup> (% cls)	Titolante (mL)	Cl <sup>-</sup> (ppm)	Verifica Cl <sup>-</sup> (% cls)
1-PA-3-a	3,06	3,06	0,73	10,32	0,03			
1-PB-2-a	2,97	2,97	0,98	13,83	0,05			
1-PB-2-b	2,88	2,88	3,08	43,60	0,17			
1-PB-2-c	3,07	3,07	3,61	51,23	0,18			
1-PB-2-d	3,07	3,07	1,29	18,33	0,06			
1-PB-2-e	3,07	3,07	1,69	23,94	0,09			
1-PD-1-a	3,02	3,02	1,29	18,29	0,06	1,70	24,12	0,08
1-PD-1-b	3,07	3,07	1,29	18,33	0,06	1,77	25,08	0,08
1-PD-1-c	3,06	3,06	2,92	41,39	0,14	2,08	29,48	0,10
1-PD-1-d	3,02	3,02	6,85	97,09	0,33	6,04	85,69	0,29
1-TA-1-a	3,08	3,08	4,17	59,13	0,20			
1-TA-1-b	3,26	3,26	3,14	44,47	0,14			
1-TA-1-c	3,08	3,08	3,69	52,37	0,18			
1-TA-1-d	2,57	2,57	9,01	127,73	0,53			
1-TA-1-e	3,00	3,00	3,95	56,07	0,20			
1-TA-1-f	3,01	3,01	4,65	65,92	0,23			
1-TA-1-g	3,11	3,11	6,33	89,70	0,31			
1-TA-1-i	3,07	3,07	4,06	57,58	0,20			
1-TA-1-l	2,06	2,06	2,03	28,73	0,15			
1-TA-3-a	3,09	3,09	3,15	44,72	0,15	4,30	60,90	0,20
1-TA-3-b	3,17	3,17	1,31	18,52	0,06	2,85	40,41	0,13
1-TA-3-c	3,01	3,01	5,46	77,44	0,27	6,35	90,03	0,31
1-TA-3-d	3,02	3,02	6,28	89,04	0,31	6,38	90,47	0,32
1-TD-1-a	3,09	3,09	1,05	14,93	0,05			
1-TD-1-b	3,08	3,08	0,96	13,58	0,04			
1-TD-1-c	3,03	3,03	1,95	27,68	0,09			
1-TD-1-d	3,08	3,08	2,30	32,59	0,11			
1-TD-1-e	3,06	3,06	1,95	27,65	0,09			
1-TD-1-f	2,16	2,16	0,72	10,22	0,05			
1-TD-1-g	3,03	3,03	2,45	34,73	0,12			
1-TD-1-h	3,03	3,03	2,12	30,02	0,10			
1-TD-1-i	2,86	2,86	5,97	84,60	0,31			

Tabella 4.1: Contenuto dei cloruri calcolato rispetto al calcestruzzo dei provini della zona 1 (*terme centrali*).

Per quanto riguarda i prelievi dei pilastri B e D si è riscontrato un contenuto di cloruri compreso tra 0,05% e 0,33% in massa rispetto al calcestruzzo, che tende ad aumentare passando dagli strati superficiali esterni verso l'interno del materiale. La stessa variazione si è riscontrata nella trave D e nel terzo campione prelevato nella trave A (1-TA-3), registrando valori maggiori verso gli ultimi prelievi, mentre nel primo campione della trave A si evidenzia un contenuto più alto di cloruri che varia da 0,14% a 0,53%, assumendo valori elevati verso metà profondità. Queste considerazioni si sono riscontrate anche nella verifica del contenuto di cloruri che è stata ripetuta sui prelievi di alcuni campioni.

In seguito è stato calcolato il contenuto di cloruri in massa rispetto al cemento filtrando la soluzione dei campioni rispetto ai quali è stata ripetuta la titolazione. Dai valori riportati in

tabella 4.2 si può riscontrare che entrambi i campioni presentano un contenuto di cloruri rispetto al cemento compreso tra 0,19 e 0,88%.

<b>Nome campione</b>	<b>Residuo siliceo Peso netto secco (g)</b>	<b>Pasta cementizia + residuo siliceo Peso netto secco (g)</b>	<b>Pasta cementizia Peso netto secco (g)</b>	<b>Cl<sup>-</sup> (% cem)</b>
1-PD-1-a	1,66	2,96	1,30	0,19
1-PD-1-b	1,78	2,98	1,20	0,21
1-PD-1-c	1,81	2,93	1,12	0,26
1-PD-1-d	1,94	2,91	0,97	0,88
1-TA-3-a	1,94	3,01	1,07	0,57
1-TA-3-b	1,75	3,07	1,32	0,31
1-TA-3-c	1,44	2,88	1,44	0,62
1-TA-3-d	1,58	2,86	1,28	0,71

Tabella 4.2: Contenuto dei cloruri calcolato rispetto al cemento dei provini della zona 1 (*terme centrali*), sui quali è stata effettuata la filtrazione.

## ZONA 2

La tabella 4.3 mostra i risultati delle titolazioni effettuate sui prelievi che costituiscono i diversi campioni della zona 2 del *teatro*.

Dai valori riportati si può osservare che il campione 2-VE-2 presenta una percentuale di cloruri compresa tra 0,21% e 0,51% in massa di calcestruzzo, inferiore rispetto a quella che si è registrata nel campione 2-VE-4 e 2-VE-5. In particolare il campione 2-VE-5 presenta un contenuto di cloruri decrescente dalla superficie esterna del calcestruzzo, dove sono stati riscontrati tenori maggiori dell'1%, agli strati più interni con tenori inferiori allo 0,4%. Anche nella seconda titolazione, effettuata sui prelievi di alcuni campioni, si sono riscontrate le stesse percentuali.

Dal contenuto di cloruri in massa rispetto al cemento, ottenuti filtrando la soluzione dei campioni rispetto ai quali è stata ripetuta la titolazione, si può notare che i campioni 2-VE-4 e 2-VE-5 presentano un contenuto di cloruri maggiore dell'1% (tabella 4.4).



<b>Nome campione</b>	<b>Peso netto umido (g)</b>	<b>Peso netto secco (g)</b>	<b>Titolante (mL)</b>	<b>Cl<sup>-</sup> (ppm)</b>	<b>Cl<sup>-</sup> (% cls)</b>	<b>Titolante (mL)</b>	<b>Cl<sup>-</sup> (ppm)</b>	<b>Verifica Cl<sup>-</sup> (% cls)</b>
2-VE-1-b	3,24	3,12	3,67	52,03	0,17	2,93	41,56	0,13
2-VE-2-a	3,15	3,04	7,00	99,25	0,33	6,78	96,20	0,32
2-VE-2-b	3,06	2,94	7,52	106,56	0,36	7,68	108,96	0,37
2-VE-2-c	3,05	2,99	4,49	63,72	0,21	4,46	63,17	0,21
2-VE-2-d	3,02	2,89	10,47	148,52	0,51	10,78	152,90	0,53
2-VE-4-a	3,04	2,94	12,55	177,92	0,61	12,39	175,65	0,60
2-VE-4-b	3,02	2,9	10,87	154,18	0,53	11,66	165,37	0,57
2-VE-4-c	3,08	2,95	16,88	239,30	0,81	16,67	236,41	0,80
2-VE-4-d	2,91	2,74	9,14	129,63	0,47	7,96	112,83	0,41
2-VE-5-a	3,03	2,96	22,14	313,97	1,06	20,84	295,48	1,00
2-VE-5-b	3,15	3,09	10,00	141,79	0,46	9,90	140,38	0,45
2-VE-5-c	3,00	2,9	6,41	90,92	0,31	6,94	98,45	0,34
2-VE-5-d	3,05	2,92	7,11	100,76	0,35	8,12	115,11	0,39
2-VE-5-e	3,13	2,96	7,78	110,25	0,37	5,95	84,37	0,29
2-VE-6-d	3,03	2,87	2,02	28,62	0,10	1,82	25,84	0,09

Tabella 4.3: Contenuto dei cloruri calcolato rispetto al calcestruzzo dei provini della zona 2 (*teatro*).

<b>Nome campione</b>	<b>Residuo siliceo Peso netto secco (g)</b>	<b>Pasta cementizia + residuo siliceo Peso netto secco (g)</b>	<b>Pasta cementizia Peso netto secco (g)</b>	<b>Cl<sup>-</sup> (% cem)</b>
2-VE-4-a	2,38	2,94	0,56	3,14
2-VE-4-b	2,26	2,90	0,64	2,60
2-VE-4-c	2,33	2,95	0,62	3,79
2-VE-4-d	2,16	2,74	0,58	1,95
2-VE-5-a	2,33	2,96	0,63	4,68
2-VE-5-b	2,32	3,09	0,77	1,82
2-VE-5-c	2,26	2,90	0,64	1,53
2-VE-5-d	2,26	2,92	0,66	1,75
2-VE-5-e	2,22	2,96	0,74	1,14

Tabella 4.4: Contenuto dei cloruri calcolato rispetto al cemento dei provini della zona 2 (*teatro*), sui quali è stata effettuata la filtrazione.

### ZONA 3 e ZONA 4

In queste zone che rappresentano gli ambienti caratteristici delle *terme a mare* sono state riscontrate delle percentuali di cloruri in massa rispetto al calcestruzzo simili tra loro. Per quanto riguarda la zona 3 si riscontra un contenuto di cloruri compreso tra 0,05% e 0,16%; mentre nella zona 4, sull'unico campione prelevato, i cloruri variano da 0,09% a 0,44%, registrando il valore maggiore nel secondo prelievo (tabelle 4.5 e 4.6).

<b>Nome campione</b>	<b>Peso netto umido (g)</b>	<b>Peso netto secco (g)</b>	<b>Titolante (mL)</b>	<b>Cl<sup>-</sup> (ppm)</b>	<b>Cl<sup>-</sup> (% cls)</b>
3-V-1-a	3,11	3,04	1,35	19,17	0,06
3-V-1-b	3,07	2,90	2,01	28,50	0,10
3-V-1-c	3,11	3,00	2,64	37,36	0,12
3-V-2-a	3,06	2,97	1,24	17,54	0,06
3-V-2-b	3,19	3,05	3,44	48,77	0,16
3-V-2-c	2,97	2,82	2,35	33,27	0,12
3-V-2-d	2,92	2,77	1,01	14,25	0,05
3-V-3-a	3,05	2,99	1,08	15,37	0,05
3-V-3-b	3,04	2,89	2,14	30,36	0,11
3-V-3-c	3,04	2,79	2,54	36,07	0,13
3-V-3-d	3,07	2,90	1,78	25,20	0,09

Tabella 4.5: Contenuto dei cloruri calcolato rispetto al calcestruzzo dei provini della zona 3 (*terme a mare-frigidarium*).

<b>Nome campione</b>	<b>Peso netto umido (g)</b>	<b>Peso netto secco (g)</b>	<b>Titolante (mL)</b>	<b>Cl<sup>-</sup> (ppm)</b>	<b>Cl<sup>-</sup> (% cls)</b>
4-TE-1-a	3,12	2,98	1,83	25,88	0,09
4-TE-1-b	3,05	2,79	8,74	123,88	0,44
4-TE-1-c	3,04	2,89	3,34	47,35	0,16

Tabella 4.6: Contenuto dei cloruri calcolato rispetto al calcestruzzo dei provini della zona 4 (*terme a mare-calidarium*).

### 4.3 RISULTATI DELLE PROVE FISICHE

Dalle prove fisiche effettuate sui diversi campioni, osservando la figura 4.5 che riporta l'andamento della percentuale di umidità che varia in funzione delle diverse condizioni di esposizione, si può notare che i provini avevano una percentuale di umidità iniziale che oscillava tra 2,64 e 3,71% riferito alla massa, che in seguito si è azzerata quando sono stati sottoposti ad essiccazione. Nel ciclo d'immersione invece si nota un notevole aumento della percentuale di umidità che raggiunge valori compresi tra 6,90 e 7,57%. Infine, durante i periodi in camera climatica a 20°C di temperatura e differenti condizioni di umidità relativa, si può osservare che la percentuale di umidità decresce con il diminuire della percentuale di umidità relativa, registrando un netto calo tra il periodo d'immersione e il periodo della camera climatica con il 95% di umidità relativa.

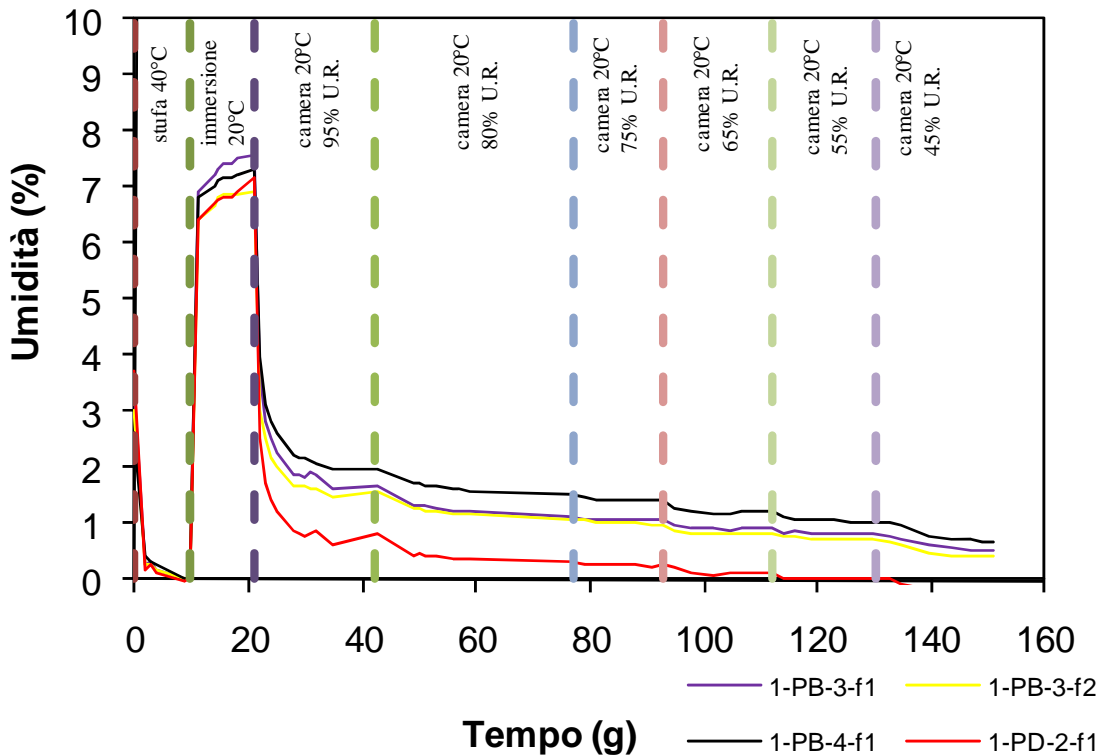


Figura 4.5: Grafico che mette in relazione la variazione della percentuale di umidità dei diversi provini con l'avanzare del tempo, in funzione delle diverse condizioni di esposizione.

La figura 4.6 riporta l'andamento della resistività elettrica in funzione del tempo, che presenta un andamento opposto, in base alle diverse condizioni di esposizione, rispetto a quello della percentuale di umidità. Inizialmente i provini presentavano una resistività elettrica molto variabile, compresa tra 79 e 3289  $\Omega\text{m}$ , che risulta influenzata dalla percentuale di umidità iniziale. Infatti nel provino 1-PD-2-f1, caratterizzato da una resistività di 79  $\Omega\text{m}$ , si è registrata la percentuale di umidità più alta, pari a 3,71%; mentre nel provino 1-PB-4-f1, nel quale si è misurata la resistività maggiore, è stata riscontrata una percentuale di umidità inferiore pari a 2,64%. Nel periodo di essiccazione, quindi, la resistività elettrica dei provini è aumentata notevolmente registrando un valore massimo pari a 220000  $\Omega\text{m}$ , mentre nella condizione d'immersione si è abbassata fino a raggiungere un minimo di 88  $\Omega\text{m}$ . Infine nelle condizioni successive la resistività ritorna ad aumentare, a causa della diminuzione della percentuale di umidità relativa impostata nella camera climatica, registrando un aumento più marcato tra il periodo d'immersione e il periodo caratterizzato dal 95% di umidità relativa.

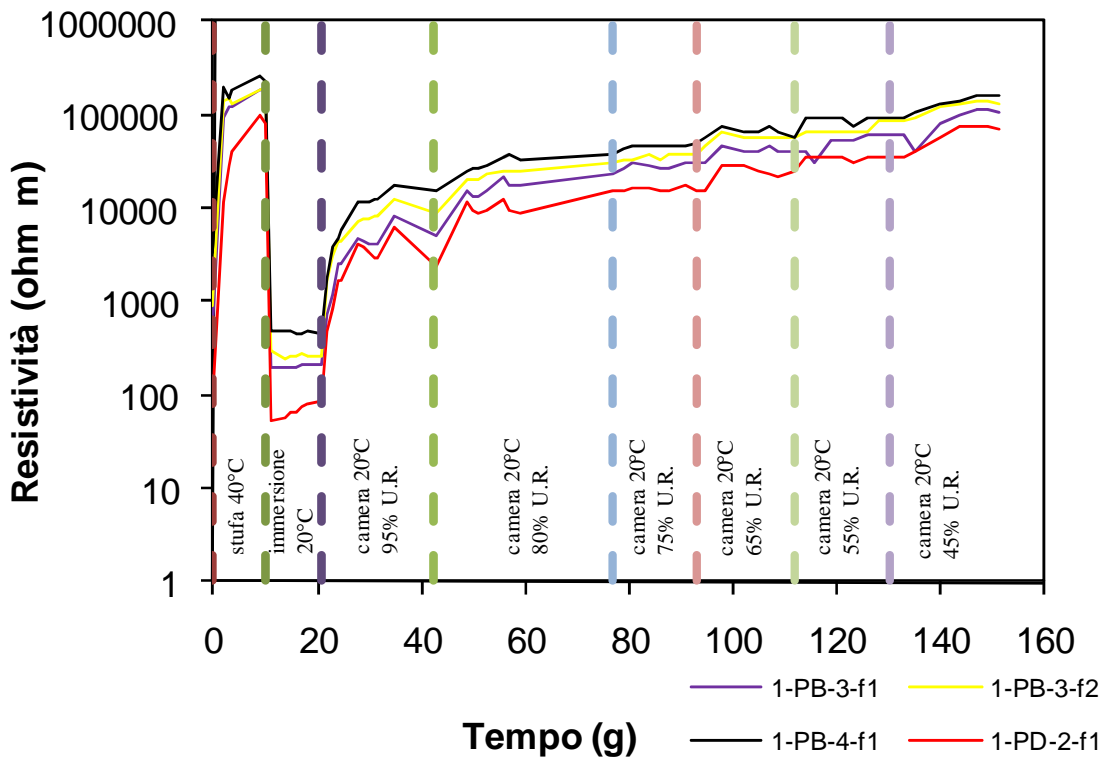


Figura 4.6: Grafico che mette in relazione la variazione della resistività elettrica dei diversi provini con l'avanzare del tempo, in funzione delle diverse condizioni di esposizione.

#### 4.4 RISULTATI DELLA DIFFRAZIONE DI RAGGI X

Grazie alla diffrazione di raggi X è stato possibile identificare le sostanze cristalline presenti negli aggregati 1-PB-3-p1 e 1-TC-1-p1 attraverso l'individuazione dei picchi caratteristici dei vari composti.

Dai risultati dell'esame, riportati nelle figure 4.7 e 4.8, si può osservare che entrambi sono aggregati silicei costituiti prevalentemente da quarzo  $\text{SiO}_2$ .

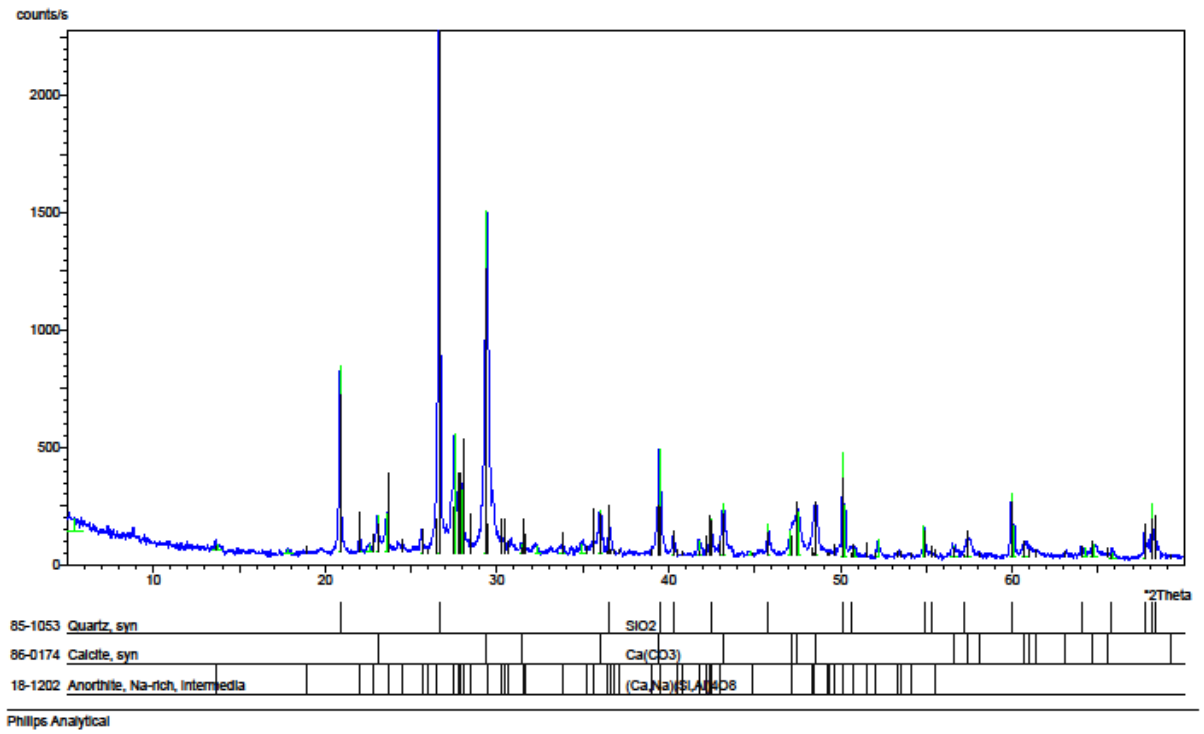


Figura 4.7: Diffrattogramma XRD dell'aggregato 1-PB-3-p1.

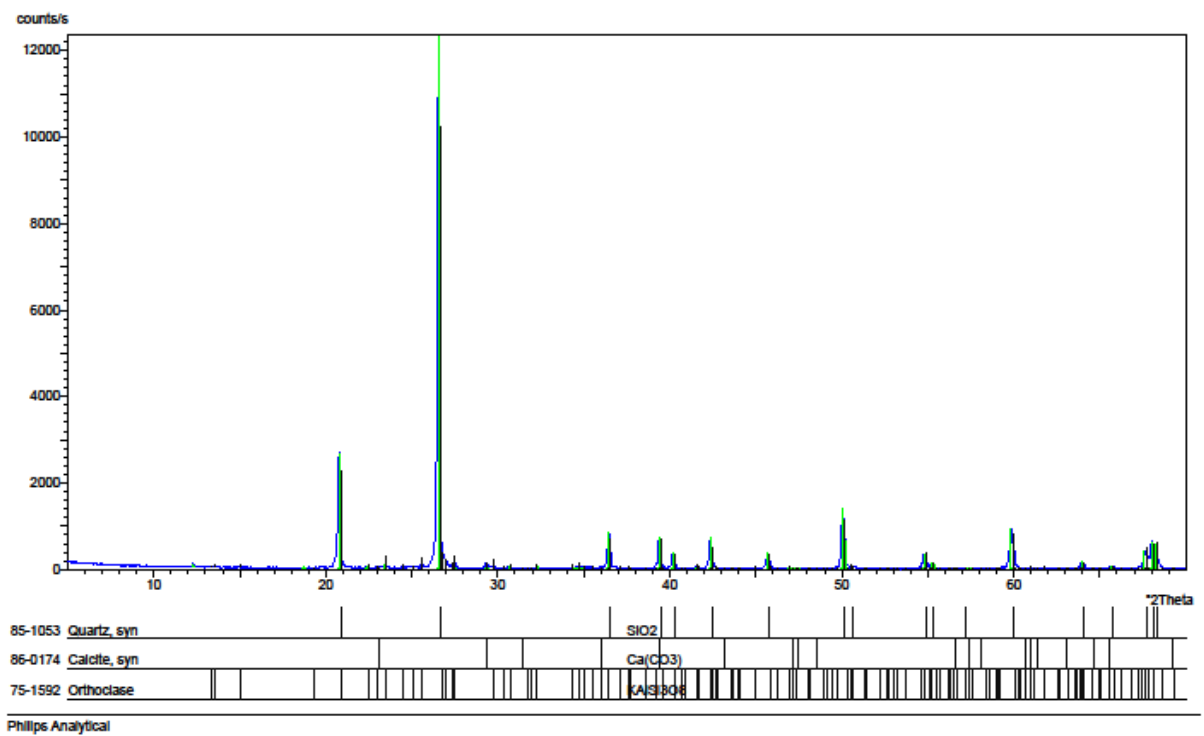


Figura 4.8: Diffrattogramma XRD dell'aggregato 1-TC-1-p1.

## 4.5 RISULTATI DELLE OSSERVAZIONI ESEM

Sul frammento 1-PB-3-f3 sono state osservate con diversi ingrandimenti due zone indicate nella figura 4.9. I risultati delle osservazioni effettuate nella prima zona sono riportati nelle figure 4.10a÷4.10c. Nella figura 4.10d, che rappresenta l'ingrandimento della prima zona, sono state indicate le aree nelle quali è stata effettuata l'analisi elementare con sonda EDS, mentre le figure 4.11a e 4.11b mostrano i risultati ottenuti. Nella prima area sono presenti prevalentemente i composti chimici del silicio e dell'ossigeno, riconducibili agli elementi che compongono gli aggregati, come dimostrato dalla diffrazione di raggi X; invece la seconda area è caratterizzata da una maggiore quantità di calcio, rappresentata dal picco più alto, e da altri elementi come l'ossigeno, il silicio, l'alluminio e il carbonio, che rappresentano i composti presenti nella pasta cementizia.

Le immagini riportate nelle figure 4.12a e 4.12b mostrano invece i risultati dell'osservazione al microscopio elettronico effettuata nella zona 2 del frammento 1-PB-3-f3. Dalle immagini si può riscontrare che, in entrambe le zone osservate, la microstruttura del calcestruzzo presenta un aspetto morfologico sufficientemente compatto sia nella pasta cementizia sia nella zona di transizione tra aggregati e pasta cementizia. Nella figura 4.12c sono state indicate le aree nelle quali è stata effettuata l'analisi elementare con sonda EDS, mentre le figure 4.13a e 4.13b mostrano i risultati ottenuti, rispettivamente nell'area 1 e 2. Nell'aggregato, corrispondente alla prima area, si è riscontrata la presenza di silicio, ossigeno e in percentuali minori anche di alluminio, potassio e calcio; mentre nella pasta cementizia, identificata dalla seconda area, sono presenti gli elementi del calcio, del silicio e dell'alluminio.

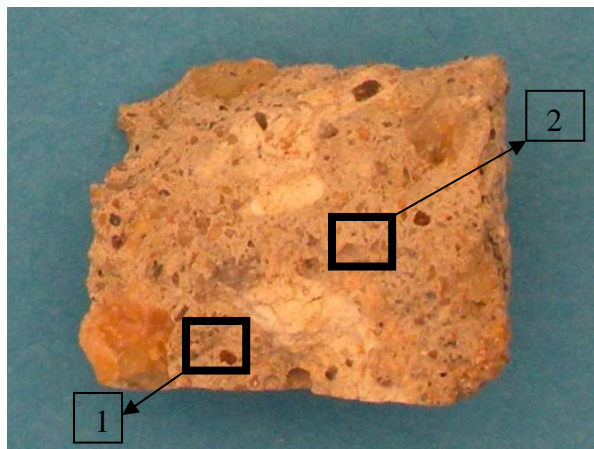


Figura 4.9: Frammento 1-PB-3-f3 con l'indicazione delle due zone osservate al microscopio elettronico (ESEM).

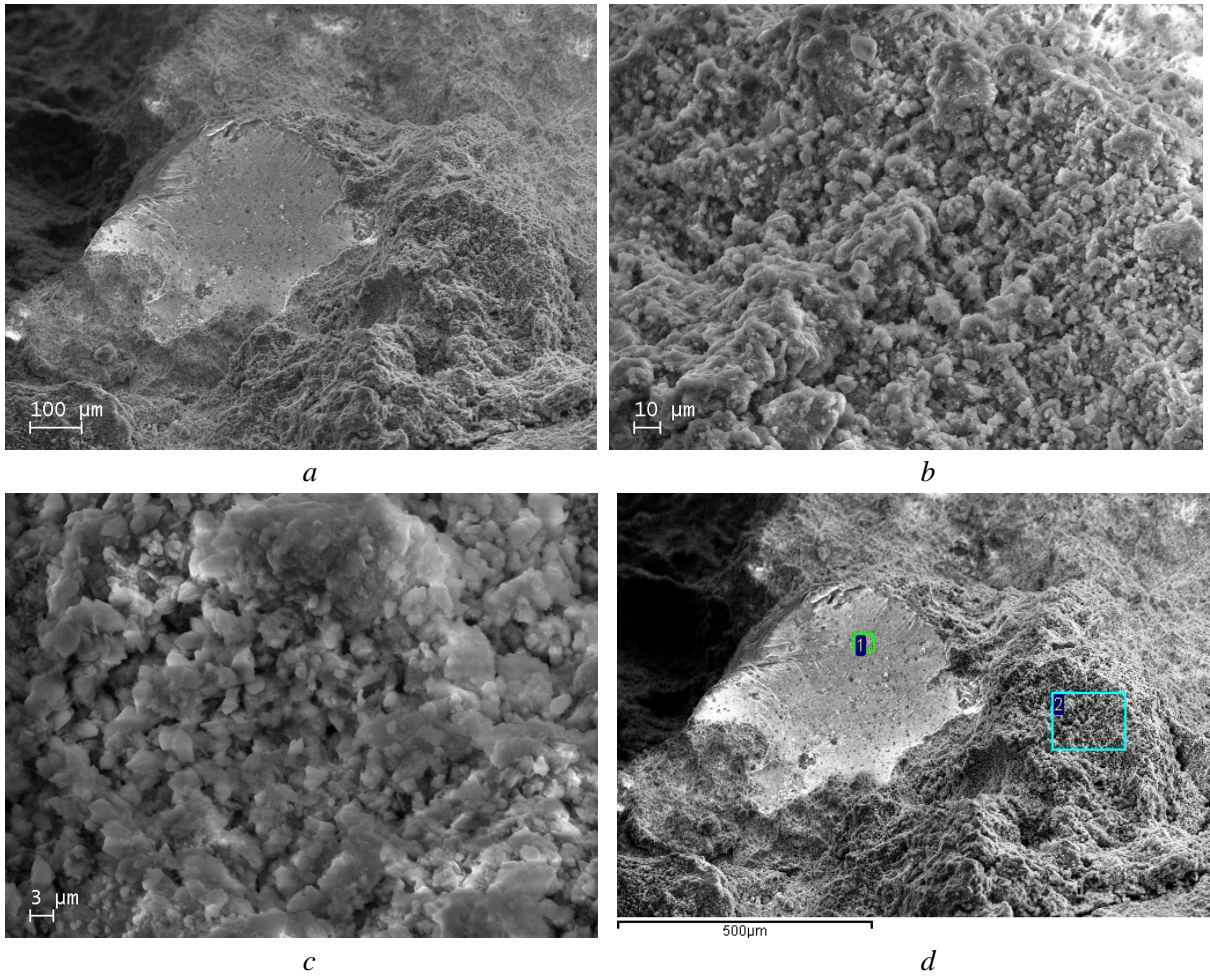


Figura 4.10: Osservazione al microscopio elettronico a scansione ambientale (ESEM) nella zona 1 del frammento 1-PB-3-f3 con diversi ingrandimenti, della pasta cementizia e dell'aggregato (*a* e *d*); della sola pasta cementizia (*b* e *c*) con l'indicazione delle aree nelle quali è stata effettuata l'analisi elementare.

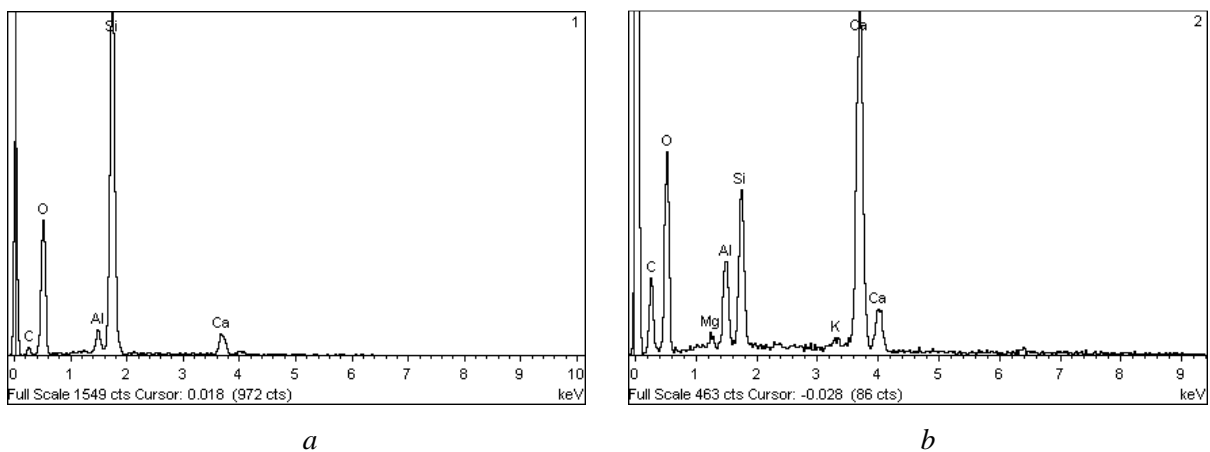


Figura 4.11: Analisi elementare degli elementi chimici presenti, *a*: nell'area 1; *b*: nell'area 2.

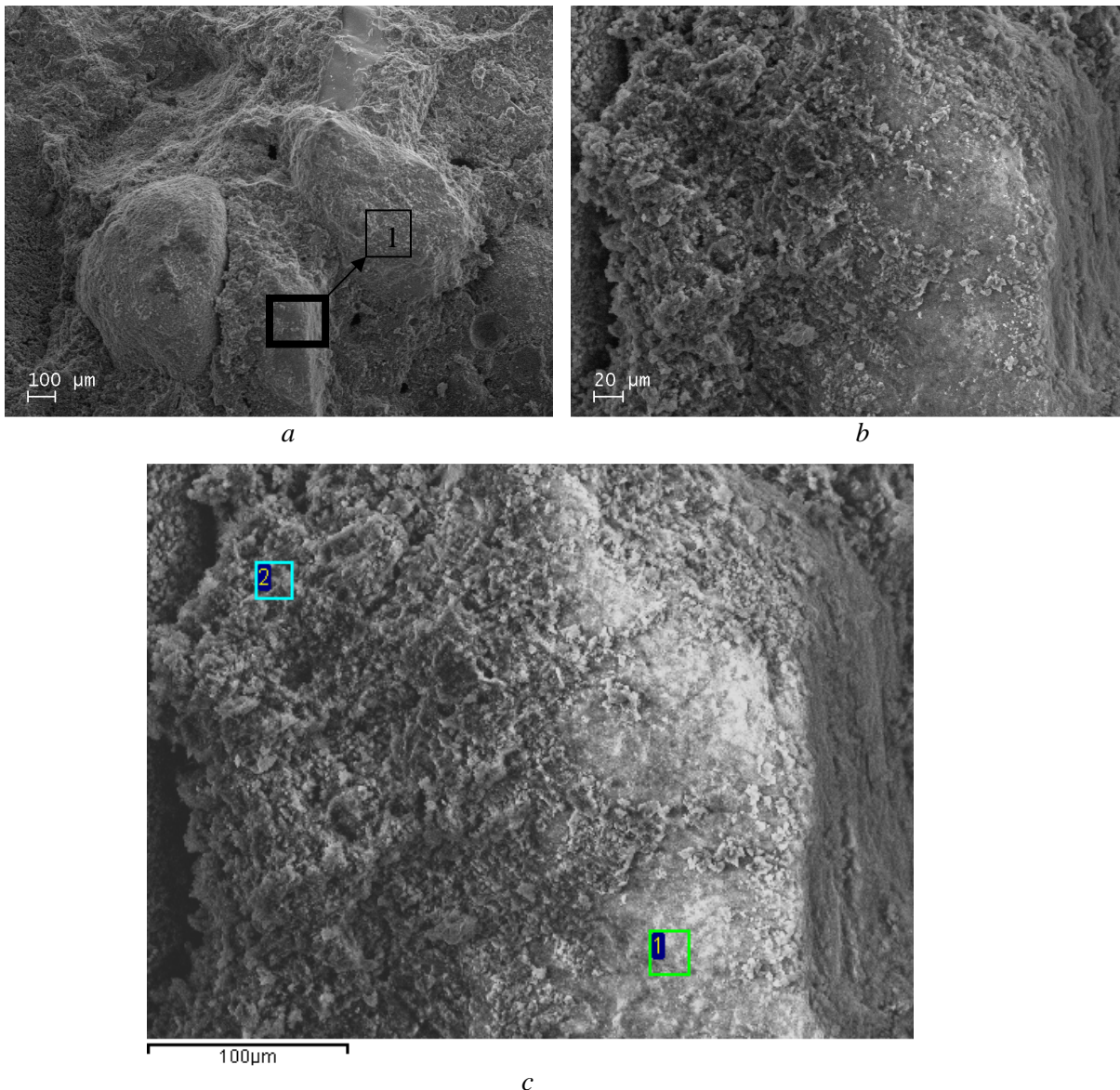


Figura 4.12: Osservazione al microscopio elettronico a scansione ambientale (ESEM) nella zona 2 del frammento 1-PB-3-f3, *a*: ingrandimento della pasta cementizia e dell'aggregato; *b*: particolare dell'ingrandimento del punto 1 indicato nella prima immagine; *c*: ulteriore ingrandimento della pasta cementizia e dell'aggregato con l'indicazione delle aree nelle quali è stata effettuata l'analisi elementare.

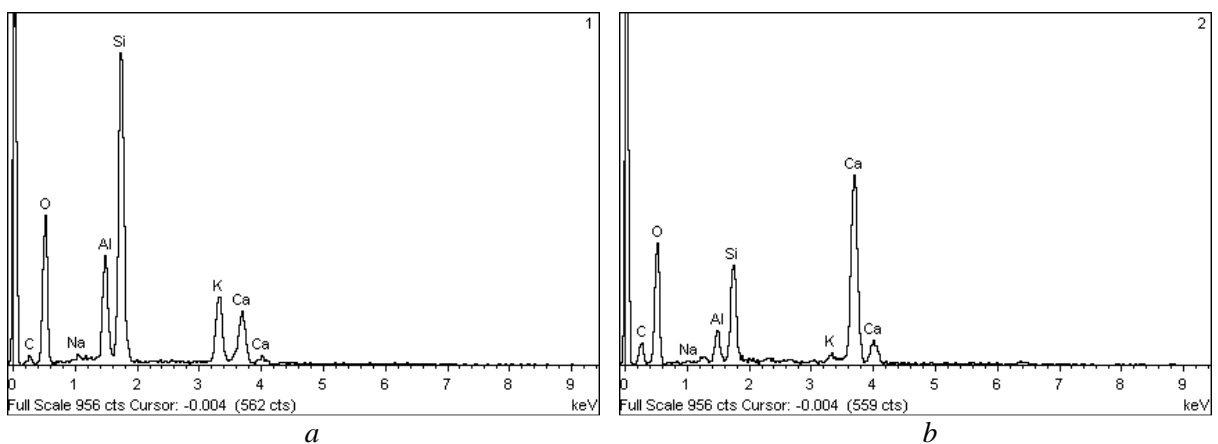


Figura 4.13: Analisi elementare degli elementi chimici presenti, *a*: nell'area 1; *b*: nell'area 2.



## **CAPITOLO 5**

### **DIAGNOSI DELLO STATO DI CONSERVAZIONE**

Nel presente capitolo si discutono i risultati delle prove effettuate sia in campo che in laboratorio e si esamina il loro significato in relazione alle cause che hanno provocato lo stato di degrado nelle diverse zone. Il primo paragrafo è dedicato alla discussione dei risultati ottenuti nella zona delle *terme centrali*, su cui si è concentrata la maggior parte delle ispezioni, mentre nel secondo paragrafo si discutono i risultati ottenuti nelle altre zone.

#### **5.1 TERME CENTRALI**

La zona delle *terme centrali* comprende alcuni elementi in calcestruzzo armato soggetti ad un avanzato stato di degrado causato dalla corrosione delle barre d'armatura. Nel seguito si discutono i risultati delle prove in situ e in laboratorio che hanno permesso di caratterizzare il calcestruzzo e di determinare le condizioni di corrosione delle armature e le cause del degrado osservato.

##### **5.1.1 CARATTERIZZAZIONE DEL CALCESTRUZZO**

Anche se dall'osservazione visiva delle *terme centrali* si è evidenziato un avanzato stato di degrado di alcuni elementi in calcestruzzo armato, causato dalla corrosione delle barre d'armatura, nelle zone dove non risulta degradato il calcestruzzo si presenta coeso, senza fenomeni di segregazione e con una superficie esterna esente da fessure. In generale si può ritenere che il calcestruzzo sia un materiale ragionevolmente omogeneo e che presenti una discreta qualità, come evidenziato dalle misure sclerometriche caratterizzate da un valore medio di 38 e da un intervallo di variazione pari a 19.

Assumendo che la distribuzione di frequenza riportata in figura 5.1 sia rappresentativa della distribuzione di frequenza della resistenza caratteristica del calcestruzzo, si può stimare, sia pure solo in modo indicativo una resistenza caratteristica di 30 MPa. Anche considerato che questo valore è sovrastimato a causa della carbonatazione del calcestruzzo, si può assumere che la resistenza del calcestruzzo sia rappresentativa di un calcestruzzo di “buona qualità” per gli anni '70.

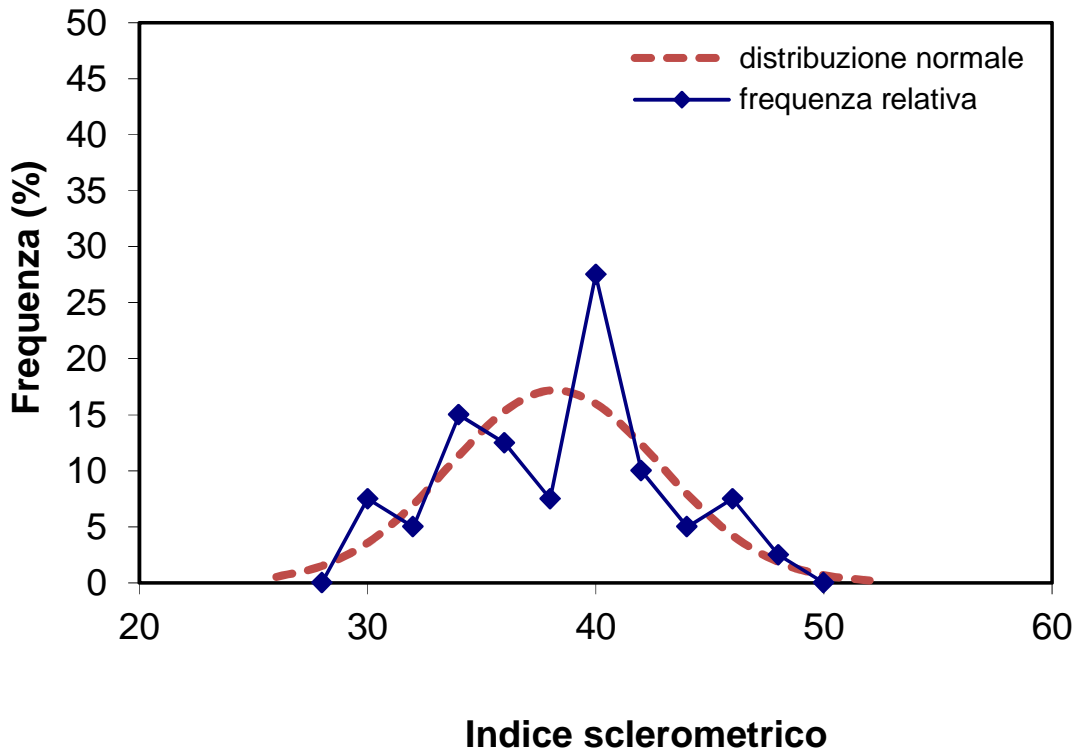


Figura 5.1: Analisi di frequenza dell'indice sclerometrico.

Anche dalle prove fisiche effettuate su alcuni provini della zona 1 si è riscontrato un calcestruzzo compatto e denso. In particolare i valori dell'assorbimento d'acqua, che è una misura indiretta della porosità aperta, variano da 6,90 a 7,57% e sono rappresentativi di un calcestruzzo di discreta qualità. Si può quindi ipotizzare che il calcestruzzo sia stato messo in opera e compattato correttamente.

Dal grafico riportato in figura 5.2, che correla la resistività elettrica del calcestruzzo al contenuto percentuale di umidità, si può notare come la resistività elettrica del calcestruzzo sia legata alla percentuale di umidità, registrando nel periodo di saturazione dei valori compresi tra 88 e 450  $\Omega\text{m}$ . I diversi andamenti ottenuti sui quattro provini, ed in particolare i valori di resistività inferiori ottenuti sul provino 1-PD-2-f1, possono essere attribuiti alla diversa concentrazione di cloruri, che influenza la resistività elettrica del calcestruzzo, piuttosto che ad una disomogeneità della microstruttura del materiale. Dai risultati si è infatti riscontrato che nel pilastro D è presente una percentuale di cloruri sensibilmente superiore rispetto a quella nel pilastro B (paragrafi 4.2 e 4.3). L'influenza dei cloruri sui valori di resistività elettrica non consente di utilizzare questo parametro per valutare le caratteristiche microstrutturali del calcestruzzo (in particolare la porosità capillare che, in assenza di cloruri, è invece correlata alla resistività).

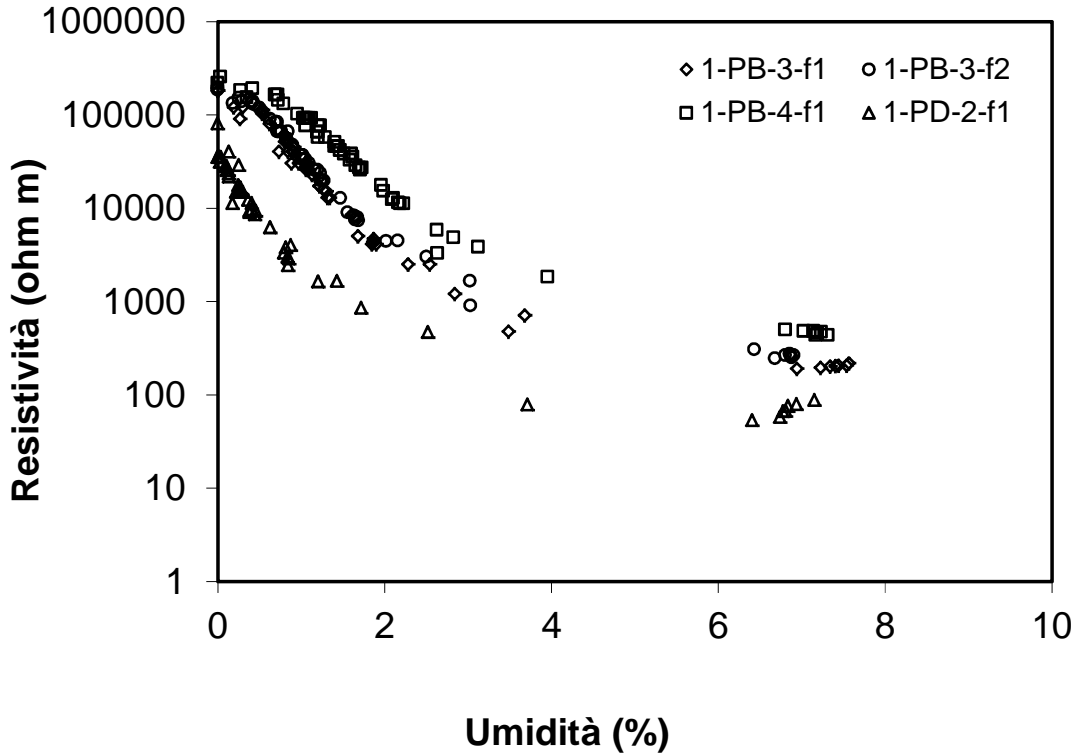


Figura 5.2: Correlazione tra resistività elettrica e contenuto di umidità dei diversi provini di calcestruzzo.

Anche dall'osservazione al microscopio elettronico a scansione ambientale (ESEM) si è riscontrato un aspetto morfologico del calcestruzzo compatto sia nella pasta cementizia che nella zona di transizione tra pasta cementizia e aggregato (paragrafo 4.5). Inoltre non si è osservata la presenza di prodotti di reazione conseguenti a fenomeni di degrado espansivi che possono generare delle fessure, come i cristalli aghiformi di ettringite all'interno di cavità e pori della pasta cementizia, che si possono formare a causa dell'esposizione del materiale in ambienti contenenti solfati, come l'ambiente marino dove si trova il sito. Non ci sono, quindi, motivi per ritenere che ci siano altre forme di degrado oltre alla corrosione delle armature. Dall'analisi elementare al microscopio elettronico a scansione si è riscontrata la presenza di calcio, ossigeno, silicio e alluminio, che sono gli elementi tipici di un cemento Portland, mentre gli aggregati sono risultati prevalentemente di natura silicea, con tracce di carbonato di calcio, come si è riscontrato anche dall'analisi di diffrazione dei raggi X (paragrafo 4.4).

Un'altra prova utile per la caratterizzazione del calcestruzzo è rappresentata dalla misura della profondità di carbonatazione effettuata in situ. I risultati ottenuti da questa prova presentano una forte incertezza dovuta al fatto che i campioni sono stati prelevati sotto forma di polvere, attraverso l'utilizzo di un trapano, e che l'avanzamento di ogni singolo prelievo è stato all'incirca di 20 mm. Non è stato dunque possibile misurare la profondità di carbonatazione esatta, come si fa in genere su una carota di calcestruzzo; è comunque possibile ipotizzare che

la profondità di carbonatazione “vera” sia compresa all’interno del primo prelievo risultato alcalino dalla prova alla fenolftaleina, in quanto è ragionevole supporre che anche una piccola frazione di polvere alcalina abbia colorato l’intero saggio utilizzato per la prova. Per questo si sono definiti due valori di profondità di carbonatazione: uno minimo pari alla profondità d’inizio del primo prelievo risultato alcalino e uno massimo corrispondente alla profondità di fine del primo prelievo alcalino. Dalla profondità di carbonatazione che è stata raggiunta in un determinato tempo, corrispondente all’età della struttura, si riesce a ricavare la velocità di penetrazione della carbonatazione calcolando il coefficiente di carbonatazione K espresso in  $\text{mm/anno}^{0,5}$ , definito dal rapporto tra lo spessore di carbonatazione espresso in mm e la radice quadrata del tempo espresso in anni ( $K=s/\sqrt{t}$ ). Nel nostro caso, sapendo che gli interventi di ripristino presenti nell’area delle *terme centrali* sono stati realizzati negli anni 1960-70 e che il sopralluogo nel sito archeologico è stato effettuato nel 2011, si è considerata a favore di sicurezza un’età pari a 41 anni (1970-2011). Anche il coefficiente di carbonatazione K assume un valore minimo ed uno massimo utilizzando rispettivamente nella formula il valore minimo e massimo della profondità di carbonatazione (tabella 5.1).

CAMPIONE	ESPOSIZIONE	PROFONDITA' DI CARBONATAZIONE (mm)		COEFFICIENTE DI CARBONATAZIONE K ( $\text{mm/anno}^{0,5}$ )	
		MIN	MAX	MIN	MAX
1-PB-2(5)	sud-ovest	20	41	3,12	6,40
1-PD-1(4)	sud-ovest	65	85	10,15	13,27
1-TA-3(4)	sud-est	40	62	6,25	9,68
1-TA-1(10)	sud-est	65	82	10,15	12,81
1-TA-1(10)	nord-ovest	20	45	3,12	7,03
1-TD-1(10)	nord-ovest	83	101	12,96	15,77
1-TD-1(10)	sud-est	55	84	8,59	13,12

Tabella 5.1: Valori minimi e massimi della profondità di carbonatazione e del coefficiente di carbonatazione K dei diversi campioni prelevati.

Il coefficiente di carbonatazione minimo varia da 3,12 a 12,96  $\text{mm/anno}^{0,5}$  e quello massimo da 6,40 e 13,27  $\text{mm/anno}^{0,5}$ . Anche se questi dati presentano un’ampia variabilità non rappresentano solo una disomogeneità del materiale, in quanto questo coefficiente dipende da diversi fattori legati non solo al calcestruzzo ma anche all’ambiente e alle loro variazioni a livello microscopico, come per esempio il contenuto di umidità.

Un altro risultato importante, da cui si possono recuperare informazioni riguardo alla caratterizzazione del calcestruzzo e ai possibili fenomeni di degrado che può subire, è la quantità di cloruri presenti nel materiale. Nei calcestruzzi delle *terme centrali* si è riscontrata un’elevata concentrazione di cloruri e i profili ottenuti non presentano il tipico andamento

decescente che si ottiene quando i cloruri penetrano dall'ambiente esterno, ma sono compresi, a meno della loro variazione, in una fascia prevalentemente costante alle diverse profondità. Da questi dati emerge che i cloruri sono stati introdotti nella preparazione del calcestruzzo attraverso l'utilizzo di materie prime già contaminate, come possono essere l'acqua d'impasto e gli aggregati. Ad esempio, osservando i grafici di figura 5.3, che riportano il profilo dei cloruri nelle travi A e D, si nota che anche a profondità elevate, dell'ordine di 100 mm, è presente un'alta percentuale di cloruri che non si riscontra quando i cloruri penetrano dall'esterno, considerato anche le condizioni riparate a cui sono esposti questi elementi.

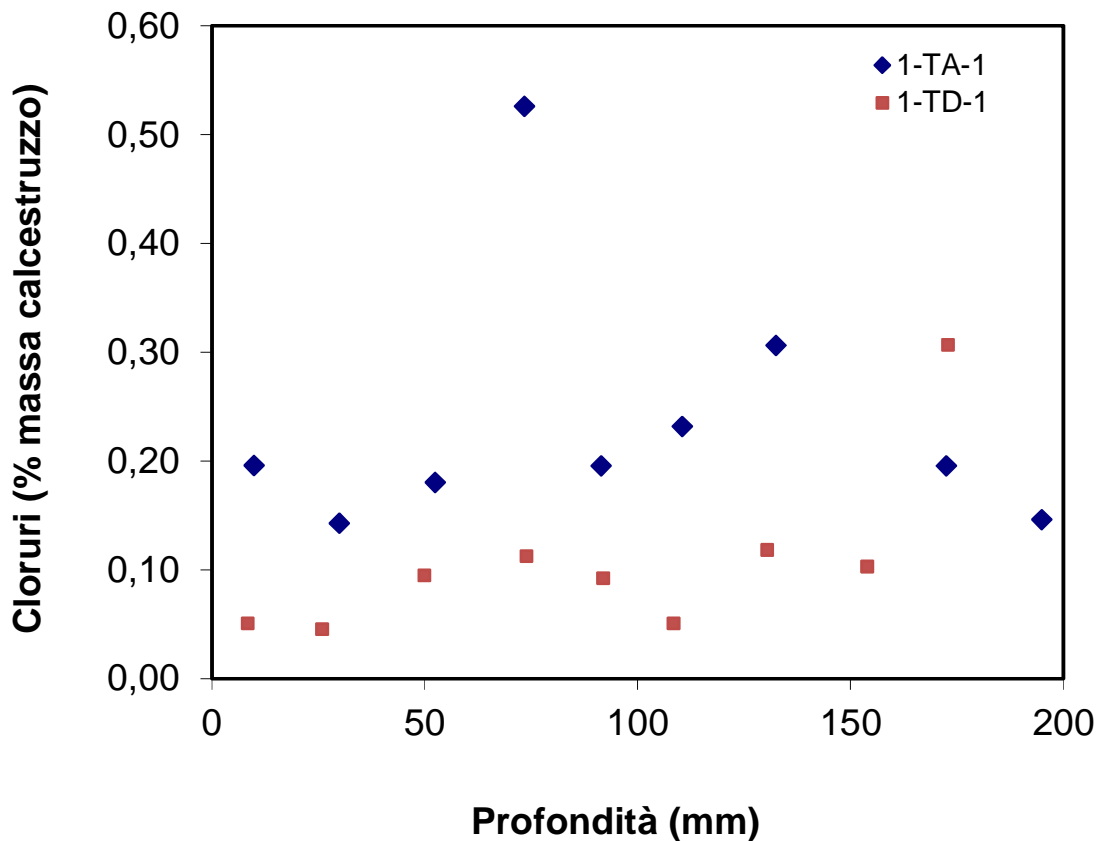


Figura 5.3: Profilo dei cloruri in funzione della profondità di prelievo del campione 1-TA-1 e 1-TD-1.

Complessivamente le analisi finalizzate alla caratterizzazione del calcestruzzo hanno evidenziato un materiale di buona qualità, omogeneo ed esente da meccanismi di degrado intrinseci e da difetti macroscopici, a meno di quelli causati dalla corrosione delle armature, di cui si parlerà nel seguito. Considerato che i carichi applicati a queste strutture sono modesti, si può quindi assumere che non ci siano problemi di tipo meccanico e le travi e i pilastri possano continuare ad assolvere alla funzione strutturale. Pertanto non è necessaria la sostituzione del

calcestruzzo, almeno dove risulta integro. Viceversa è necessario verificare l'evoluzione del fenomeno della corrosione, anche per prevenire ulteriori danni al calcestruzzo.

### 5.1.2 STATO DI CORROSIONE DELLE ARMATURE

#### INNESCO

Per verificare la condizione di corrosione delle armature nelle parti di calcestruzzo ancora integre occorre stabilire se le armature sono passive, cioè sono a contatto con un calcestruzzo alcalino e privo di cloruri in quantità tale da innescare la corrosione, oppure attive quando sono a contatto con un calcestruzzo carbonatato o contaminato da cloruri. Questa verifica viene fatta confrontando lo spessore di copriferro con la profondità di carbonatazione e con i profili di concentrazione dei cloruri. Ad esempio se  $S_v$  è la profondità di carbonatazione al momento dell'ispezione e  $c$  è lo spessore di copriferro, l'armatura è attiva se  $S_v \geq c$ , mentre se  $S_v < c$  l'armatura si trova in condizioni di passività. Analogamente, la corrosione si è innescata a causa dei cloruri se  $Cl(c) > Cl_{th}$ , dove  $Cl(c)$  è la concentrazione di cloruri alla profondità del copriferro e  $Cl_{th}$  è il tenore critico per l'innescamento della corrosione. Nel caso considerato, il calcestruzzo è interessato sia dal fenomeno della carbonatazione, sia dalla contaminazione dei cloruri, e pertanto è necessario considerare entrambe le condizioni di innesco. A tale scopo è stata fatta un'analisi puntuale per ogni singolo campione analizzato, che ha permesso di verificare le condizioni di corrosione delle armature.

I grafici riportati nelle figure 5.4÷5.8 riportano i profili dei cloruri in percentuale rispetto alla massa del calcestruzzo in funzione della profondità di avanzamento del prelievo. Inoltre in ogni grafico è presente il progressivo avanzamento del prelievo rappresentato da linee verticali puntinate di nero, la posizione media del copriferro delle staffe indicata con linee verticali continue azzurre e le posizioni minima e massima del copriferro indicate con linee verticali tratteggiate di marrone. Infine per ogni intervallo di prelievo si è indicato l'esito ottenuto dalla prova alla fenoltaleina, che indica se il campione è risultato carbonatato o alcalino.

Nel grafico di figura 5.4 si riportano i profili dei cloruri rispetto alla massa di calcestruzzo e di cemento rilevati nel campione 1-TA-3. Il profilo dei cloruri rispetto alla massa di cemento è stato stimato attraverso la filtrazione della soluzione, ottenendo una quantità di cemento che varia tra 33 e 50% in massa rispetto al calcestruzzo. La percentuale di cemento calcolata risulta molto superiore rispetto alla percentuale di cemento che in genere si riscontra in un calcestruzzo di composizione normale. Infatti, supponendo che il calcestruzzo abbia una densità di  $2400 \text{ kg/m}^3$  e sia stato confezionato con  $350 \text{ kg/m}^3$  di cemento, in prima

approssimazione si può ritenere che il cemento rappresenti il 14-15% della massa del calcestruzzo. Da questo confronto si può ipotizzare che nella composizione del calcestruzzo analizzato sia presente un'alta percentuale di cemento e una bassa percentuale di aggregati, pertanto il profilo dei cloruri ottenuto rispetto al cemento risulta utile per stabilire se la corrosione si è innescata, considerando che il tenore critico è compreso tra 0,4 e 1% rispetto alla massa del cemento. Dall'analisi puntuale effettuata sul campione 1-TA-3 (figura 5.4) risulta evidente che l'innescò della corrosione delle armature è avvenuto sia a causa della carbonatazione, sia a causa della contaminazione dai cloruri. Infatti si può osservare che la profondità di carbonatazione ha ampiamente superato il campo di variazione dello spessore di copriferro e la concentrazione di cloruri risulta maggiore del tenore critico. Infine la carbonatazione ha agevolato il rilascio nella soluzione dei pori dei cloruri che erano legati alla pasta cementizia, e pertanto si può ipotizzare che questo processo abbia provocato un aumento della velocità di corrosione da carbonatazione e la corrosione per pitting delle armature.

Dall'analisi puntuale, ripetuta anche per gli altri profili riportati nelle figure 5.5÷5.8, è stato riscontrato che anche per questi elementi la carbonatazione ha raggiunto le armature e il contenuto di cloruri alla profondità delle armature ha superato il valore critico, provocando l'innescò della corrosione.

In definitiva, dopo aver analizzato nel dettaglio questi valori, si può affermare che tutte le staffe sono state depassivate a causa dell'azione sinergica della carbonatazione e della contaminazione da cloruri.

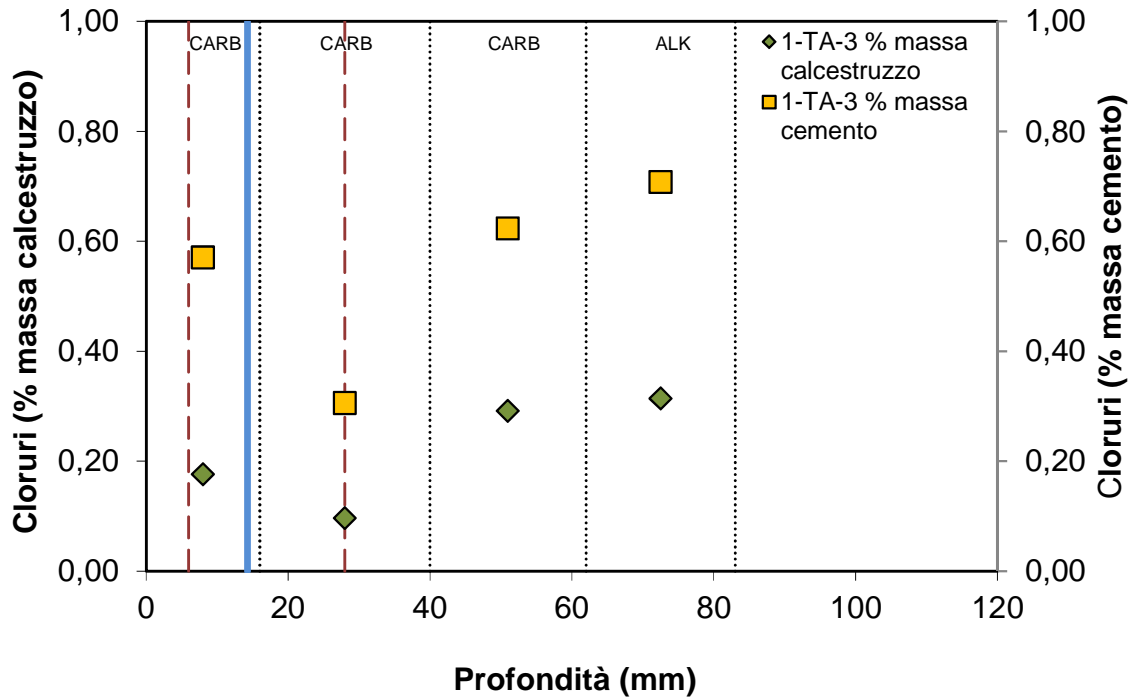


Figura 5.4: Profilo dei cloruri presenti nel campione 1-TA-3, risultati della prova alla fenolftaleina e profondità di copriferro.

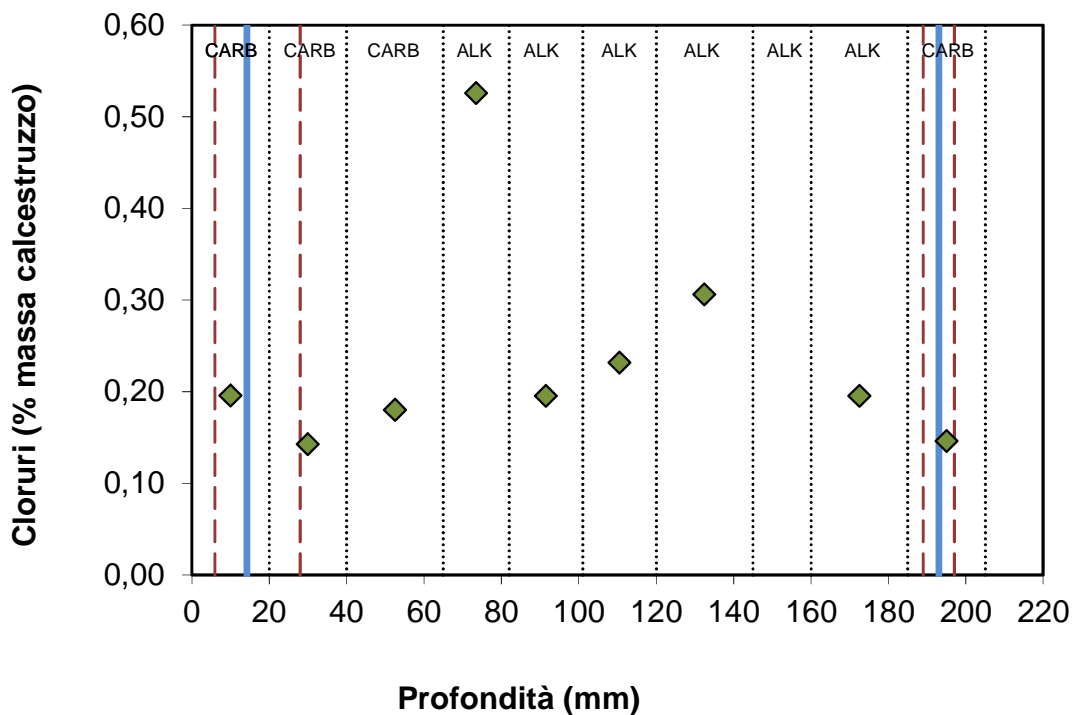


Figura 5.5: Profilo dei cloruri presenti nel campione 1-TA-1, risultati della prova alla fenolftaleina e profondità di copriferro.



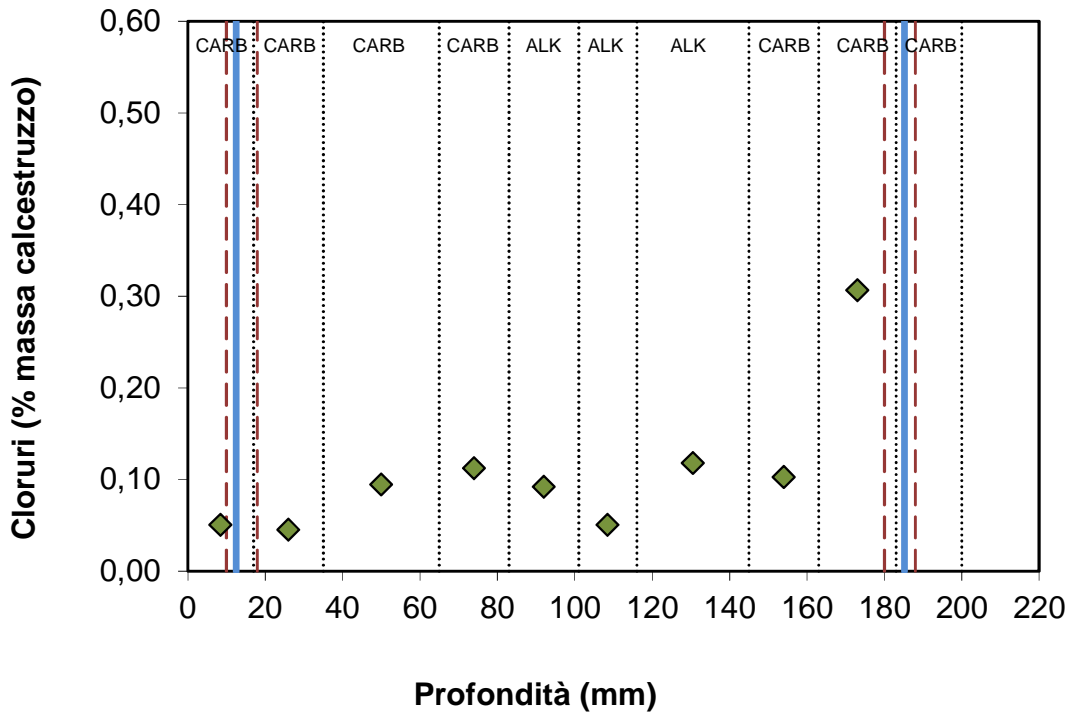


Figura 5.6: Profilo dei cloruri presenti nel campione 1-TD-1, risultati della prova alla fenolftaleina e profondità di copriferro.

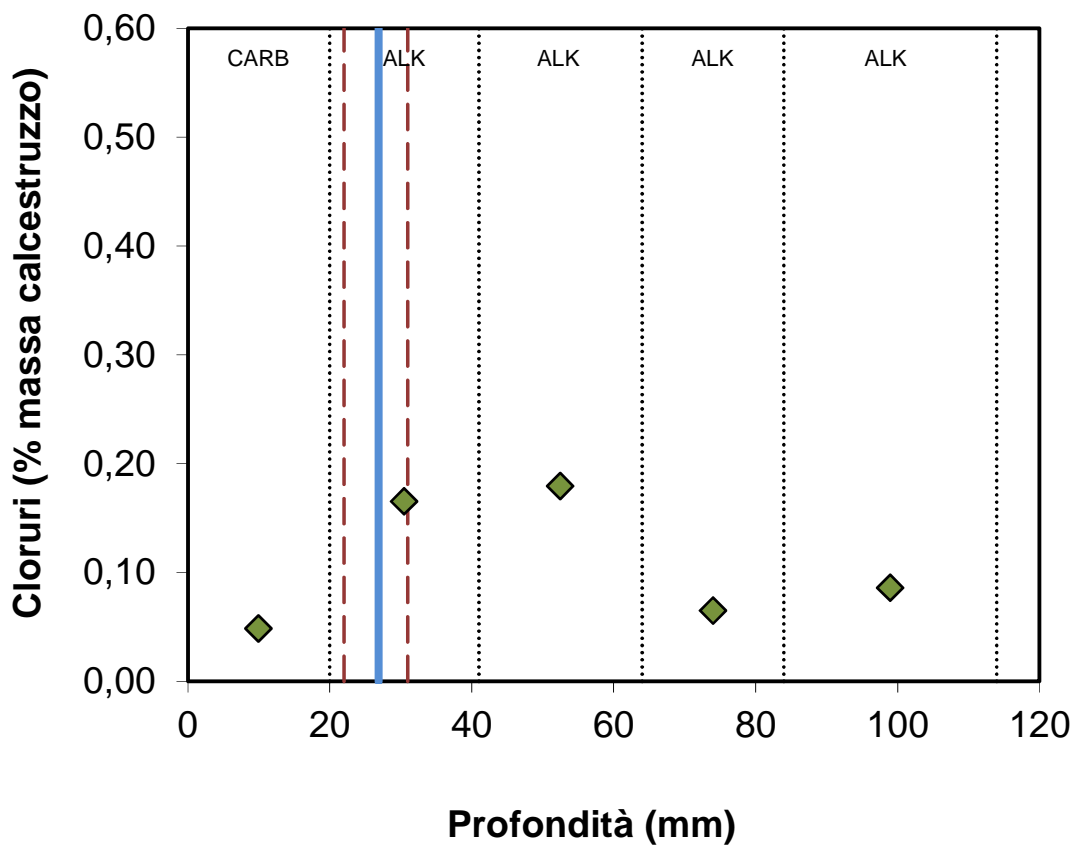


Figura 5.7: Profilo dei cloruri presenti nel campione 1-PB-2, risultati della prova alla fenolftaleina e profondità di copriferro.

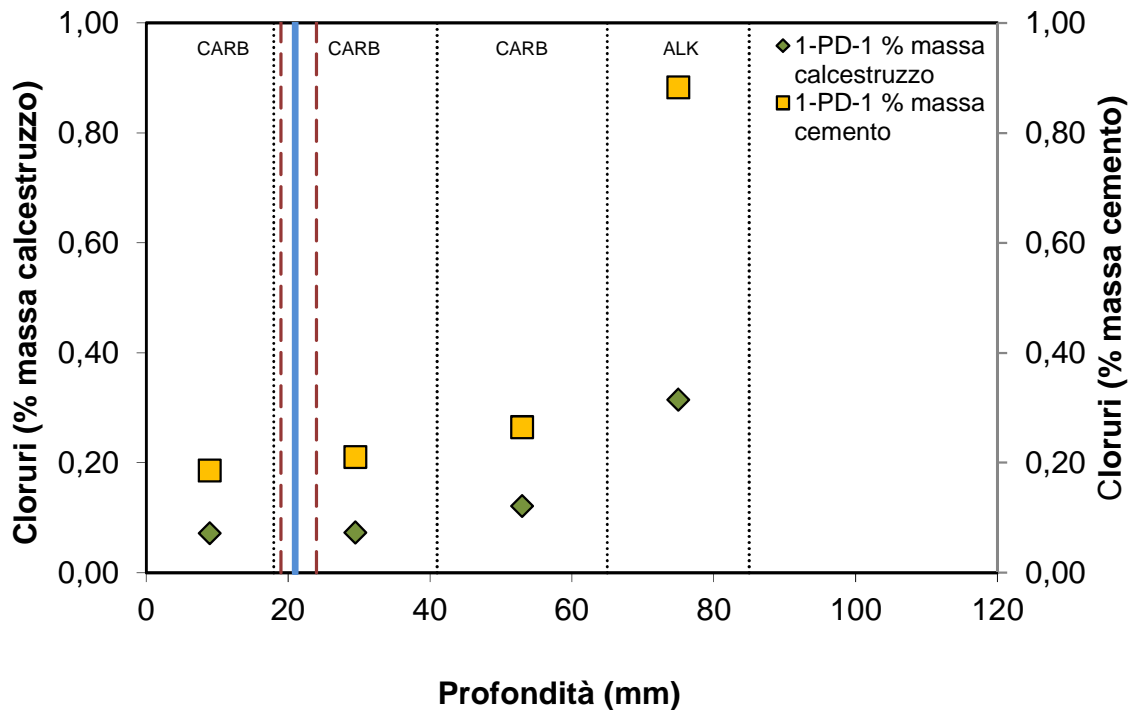


Figura 5.8: Profilo dei cloruri presenti nel campione 1-PD-1, risultati della prova alla fenoltaleina e profondità di copriferro.

### PROPAGAZIONE

Dimostrato che tutte le armature sono risultate attive e quindi si sia innescata la corrosione, la velocità con cui essa propaga dipende sia dalle condizioni locali di umidità del calcestruzzo sia dal contenuto di cloruri.

Il contenuto di umidità rappresenta il fattore principale per determinare la resistività elettrica del calcestruzzo carbonatato che può essere correlata alla velocità di corrosione, anche se non esiste una correlazione di validità generale, in quanto la resistività dipende dalle condizioni ambientali, dalle caratteristiche del calcestruzzo, dal contenuto di cloruri e dalla carbonatazione. Indicativamente si può assumere che le armature, una volta depassivate, abbiano una velocità di corrosione trascurabile per valori di resistività maggiori di 1000  $\Omega\text{m}$ , bassa per valori compresi tra 500-1000  $\Omega\text{m}$ , moderata per valori compresi tra 100-500  $\Omega\text{m}$  ed elevata per valori di resistività minori di 100  $\Omega\text{m}$ . Inoltre il contenuto di umidità del calcestruzzo è legato anche al potenziale dell'armatura, che può essere correlato con lo stato di corrosione delle armature. In particolare la norma ASTM C876 [12] stabilisce un criterio che prevede una probabilità di corrosione trascurabile (<10%) se il potenziale è maggiore di -200 mV Cu/CuSO<sub>4</sub> e una probabilità di corrosione elevata (>90%) se il potenziale è minore di -350 mV Cu/CuSO<sub>4</sub>. Dato che non esistono dei valori di potenziale che indicano con certezza lo stato di corrosione delle armature, questo criterio non risulta sempre affidabile e

quindi applicabile. Infatti in un calcestruzzo carbonatato e umido nelle zone di corrosione si possono misurare dei valori compresi tra -200 e -600 mV Cu/CuSO<sub>4</sub>, mentre in calcestruzzo carbonatato e asciutto si misurano dei potenziali molto positivi. Per questo sono necessarie correlazioni più articolate di quelle proposte dalla norma ASTM C876. Ad esempio, la figura 5.9 riporta i tipici intervalli di variazione del potenziale delle armature nel calcestruzzo, in funzione della carbonatazione, della presenza di cloruri e dell'umidità. Inoltre è utile associare le misure di potenziale di corrosione delle armature a misure di resistività elettrica del calcestruzzo [5].

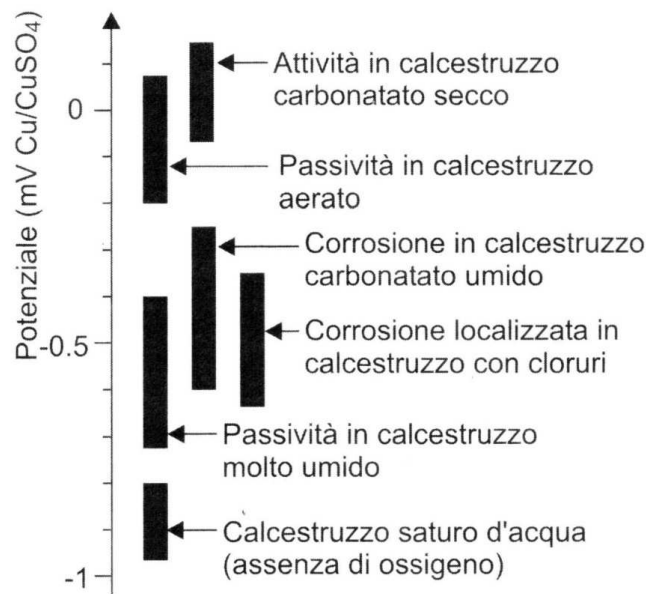


Figura 5.9: Intervalli di variazione del potenziale delle armature nel calcestruzzo, in funzione della carbonatazione, della presenza di cloruri e dell'umidità [5].

In generale dall'esperienza è stato dimostrato che in un calcestruzzo carbonatato esiste una correlazione diretta tra resistività elettrica del calcestruzzo e potenziale dell'armatura, in quanto all'aumentare della resistività del calcestruzzo si registra un aumento dei valori di potenziale. Il grafico di figura 5.10 mostra la correlazione tra resistività elettrica del calcestruzzo e potenziale dell'armatura, misurate in situ, degli elementi della zona 1.

Sebbene non si siano potute effettuare misure specifiche per valutare il contenuto di umidità del calcestruzzo al momento dell'ispezione, questa grandezza è possibile stimarla utilizzando la correlazione tra resistività elettrica e umidità ottenuta sui provini in laboratorio. La diversa contaminazione di cloruri del calcestruzzo nei diversi elementi della struttura, tuttavia, non consente di individuare una correlazione unica, ma si devono considerare le due correlazioni trovate nei due pilastri (figure 5.11 e 5.12). Entrando nei grafici di figura 5.11 e 5.12 con i valori di resistività misurati in situ, rispettivamente sui pilastri B e D, si può ipotizzare che nel

pilastro B era presente un contenuto di umidità medio pari a 1,73%, mentre nel pilastro D il contenuto di umidità medio risulta pari a 1,15%. I valori di umidità ottenuti sono indicativi, in quanto il contenuto di cloruri potrebbe non essere lo stesso in campo e nei provini di laboratorio. Anche se non sono state fatte misure sulla velocità di corrosione, confrontando questi dati si può ipotizzare che il pilastro B, pur presentando valori di resistività e potenziali elevati (data dell'ispezione settembre 2011, periodo molto caldo e asciutto), risulta soggetto ad una velocità di corrosione più alta in quanto presenta un contenuto di umidità maggiore rispetto a quello del pilastro D. Questo risultato trova un riscontro anche dall'osservazione visiva effettuata in campo, infatti nella figura 3.8 si nota che nei pilastri B e D sono presenti delle ampie fessure poste lungo le barre d'armatura, ma solo nel pilastro B si è osservato anche il distacco del copriferro in corrispondenza dello spigolo.

Per quanto riguarda l'influenza del contenuto di cloruri sulla velocità di corrosione si prendono come esempio i valori di resistività elettrica del calcestruzzo e di potenziale ottenuti sulle travi A e D (figura 5.10). In particolare si può ipotizzare che la trave A, dove si sono registrati valori di potenziale molto negativi e una resistività inferiore, risulta soggetta ad una velocità di corrosione più alta dovuta al fatto che presenta una percentuale di cloruri maggiore rispetto a quelli rilevati nella trave D. A conferma di ciò, dalla figura 3.7b, si può notare che nella trave A sono presenti ampie fessure e distacchi di copriferro.

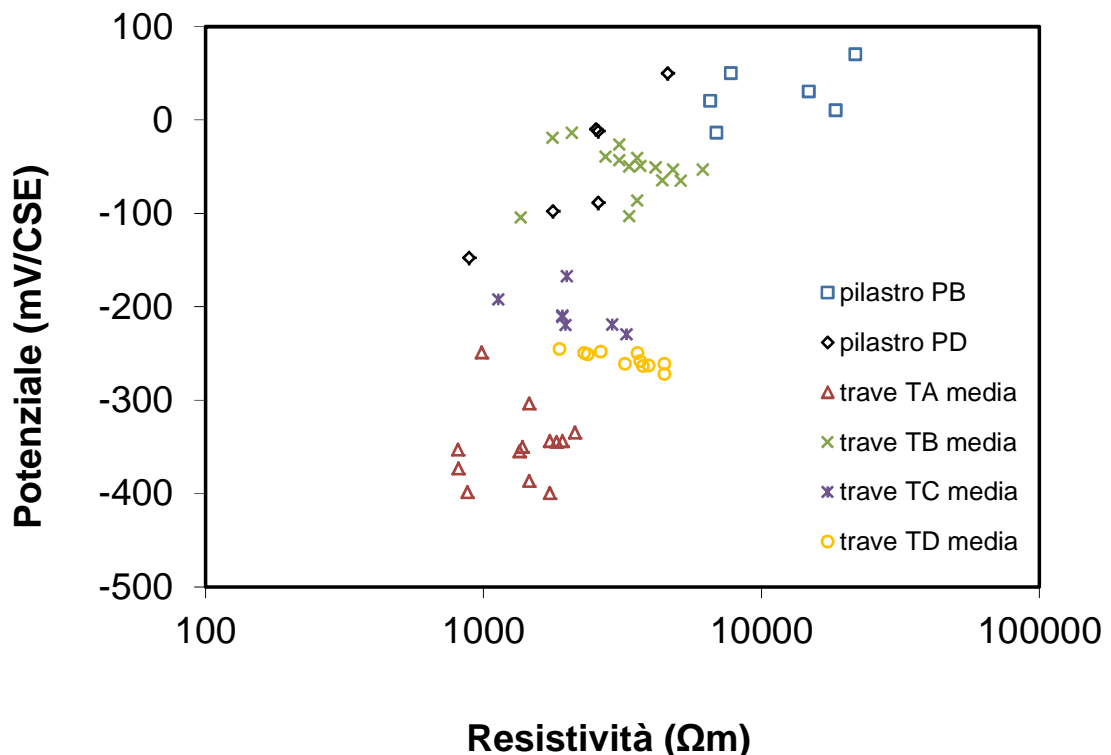


Figura 5.10: Correlazione tra potenziale delle armature e resistività elettrica del calcestruzzo misurati in situ sugli elementi della zona 1.

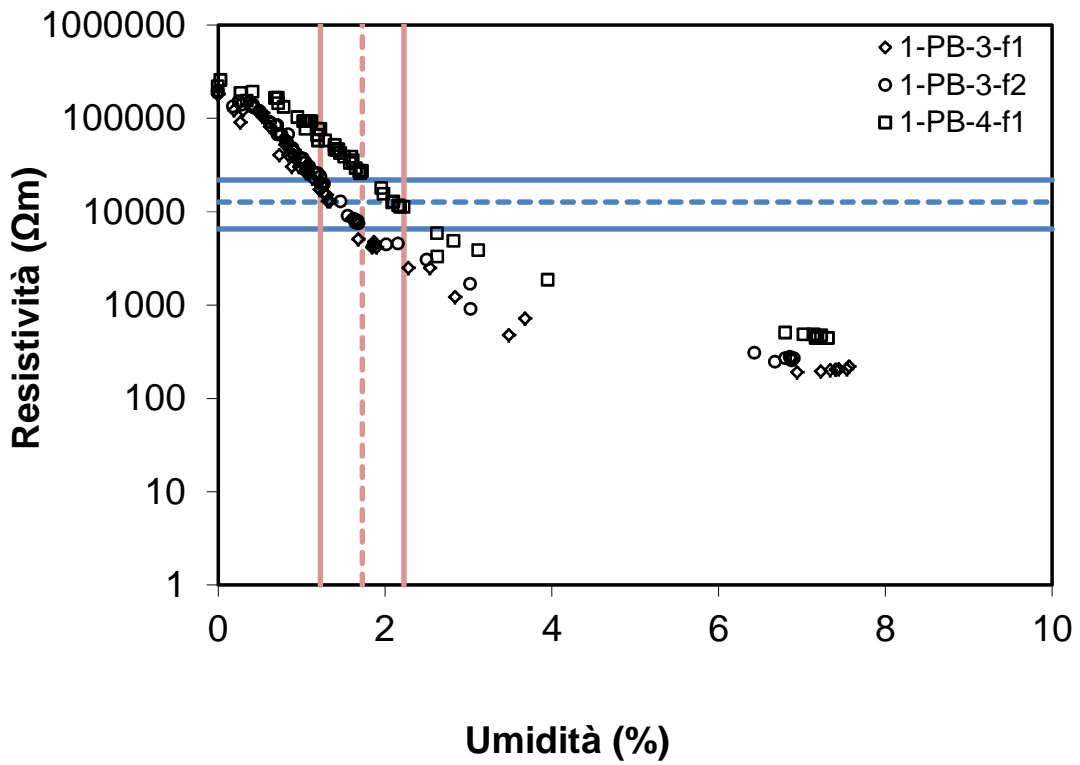


Figura 5.11: Correlazione tra resistività elettrica e percentuale di umidità dei frammenti del pilastro B.

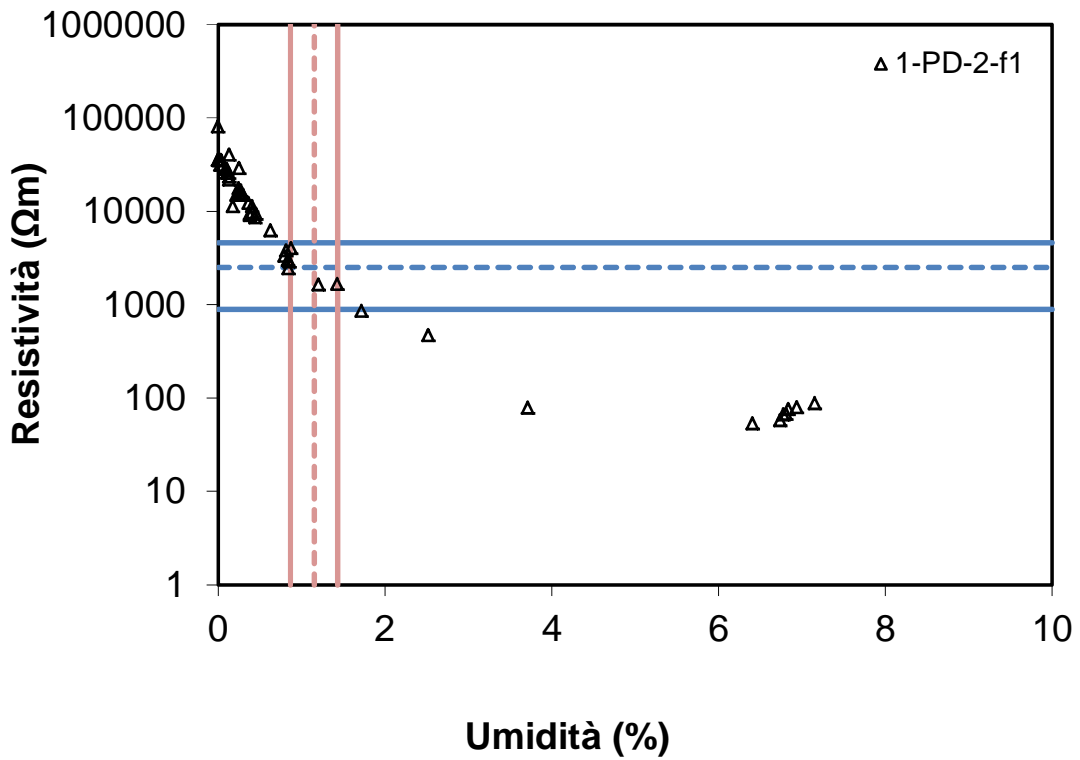


Figura 5.12: Correlazione tra resistività elettrica e percentuale di umidità del frammento del pilastro D.

### EVOLUZIONE DEL DEGRADO

Dalla diagnosi dell'innesco e della propagazione della corrosione è stato dimostrato che la struttura è stata danneggiata dalla corrosione delle armature e pertanto risulta necessario valutare l'evoluzione del degrado per decidere un intervento di ripristino.

Considerando che il calcestruzzo risulta contaminato dai cloruri, si stima che l'innesco della corrosione sia iniziato fin da subito; ma anche se i cloruri fossero stati presenti in quantità tale da non innescare l'attacco corrosivo si è potuto stimare che, a causa degli spessori di copriferro molto bassi di alcune zone, l'innesco della corrosione provocata dalla carbonatazione del calcestruzzo è avvenuto in tempi relativamente bassi (minore di 10 anni). Il tempo di innesco è stato calcolato come  $T_i=(s/K)^2$ , dove  $s$  è lo spessore medio di copriferro sulla faccia del pilastro o della trave (espresso in mm) e  $K$  rappresenta il coefficiente di carbonatazione massimo (espresso in  $\text{mm/anno}^{0,5}$ ).

In definitiva si presume che, se non si dovesse intervenire, la corrosione avanzerà ulteriormente e si potrebbero verificare altri distacchi di copriferro, com'è stato già osservato su alcuni pilastri. Pertanto si può supporre che a breve anche nelle travi e negli altri due pilastri si potrà riscontrare l'espulsione del copriferro, come risulta evidente dall'immagine 3.7a dov'è stata riscontrata la parziale espulsione dello spigolo del pilastro B.

## **5.2 ALTRE ZONE**

Dall'osservazione visiva del *teatro* e del *frigidarium* delle *terme a mare*, si può ipotizzare che anche in questo caso il calcestruzzo presenta una buona qualità in quanto non sono state riscontrate fessure, fenomeni di segregazione e di degrado evidenti. Inoltre si può ipotizzare che nella composizione di questi calcestruzzi è stata inserita una maggiore percentuale di aggregati come è stato riscontrato dalla filtrazione della soluzione di alcuni provini della zona 2 (tabella 4.4). In questa zona non si sono trovate delle vere e proprie barre d'armatura, ma solo dei fili di ferro che fuoriescono dalla superficie del calcestruzzo, e quindi non sono state effettuate le misure dello spessore di copriferro.

Nella zona 2 si è riscontrato un valore minimo della profondità di carbonatazione compreso tra 40 e 64 mm, mentre nella zona 3 si è misurata una profondità di carbonatazione intorno a 20 mm.

In assenza di armature la carbonatazione non rappresenta una causa di rischio di degrado, ma al contrario può ridurre la porosità e aumentare la resistenza del calcestruzzo. La contaminazione da cloruri, invece, può favorire il mantenimento di condizioni umide, vista la

igroscopicità di questi sali, e promuovere anche la formazione di efflorescenze, come sono state riscontrate in queste zone (figure 3.13 e 3.15b).

Nella zona del *calidarium* delle *terme a mare*, invece, si sono riscontrate delle parti in calcestruzzo armato soggette ad un'evidente stato di corrosione.

Inoltre è stata rilevata un'alta percentuale di cloruri, compresa tra 0,09 e 0,44% rispetto alla massa del calcestruzzo, che ha provocato la depassivazione delle armature presenti nella soletta. Si può ritenere, quindi, che questa zona si trova in una condizione simile a quella riscontrata sulle parti in calcestruzzo armato delle *terme centrali*.

## **CAPITOLO 6**

### **PROPOSTA D'INTERVENTO**

Quando il degrado del calcestruzzo o la corrosione delle armature provocano delle situazioni di pericolo o delle condizioni di sicurezza e funzionalità non più accettabili è necessario effettuare un intervento di recupero delle strutture danneggiate. Il progetto, finalizzato al recupero dei danni presenti, deve anche garantire una vita residua richiesta entro la quale la struttura recuperata non dovrà raggiungere un certo stato limite di riferimento che provochi la sua perdita di funzionalità, come può essere la fessurazione del copriferro o la riduzione della sezione resistente delle armature [5].

Nel presente capitolo si analizzano le diverse tecniche mirate al recupero degli elementi in calcestruzzo armato soggette ad un avanzato stato di degrado causato dalla corrosione delle barre d'armatura, promossa sia dalla carbonatazione che dai cloruri. Nel primo paragrafo vengono definiti in maniera univoca gli obiettivi principali della strategia e le tecniche con le quali è possibile raggiungere questi obiettivi; mentre nel secondo paragrafo si discute dell'applicazione delle diverse tecniche nel caso specifico della zona delle *terme centrali* del sito archeologico e, confrontando diversi fattori, si propone la tecnica più adatta da attuare in campo. Infine il terzo paragrafo è dedicato al progetto vero e proprio della protezione catodica, analizzato in ogni sua parte a partire dall'avvio della tecnica fino ad arrivare alla sua gestione e manutenzione.

#### **6.1 SCELTA DELLA STRATEGIA**

Per poter effettuare un ripristino mirato ed efficace e scegliere quindi la tecnica di restauro più adatta è necessario partire da un'analisi delle condizioni della struttura, con l'obiettivo di determinare le cause della corrosione e l'estensione del degrado.

Per ridurre la velocità di corrosione delle armature è possibile bloccare il processo anodico, riportando le armature nelle condizioni di passività attraverso la ripassivazione delle armature o l'applicazione delle tecniche elettrochimiche. In alternativa si può impedire il trasporto di corrente all'interno del calcestruzzo riducendo il suo contenuto di umidità.

I metodi che si basano sul principio della ripassivazione dell'armatura hanno come obiettivo quello di riportare le armature nella condizione di passività ed evitare che le stesse si possano corrodere durante la vita residua richiesta. Il restauro convenzionale consiste nella



sostituzione del calcestruzzo carbonatato o contaminato da cloruri con malta o calcestruzzo alcalini. Questo intervento è conveniente quando il fenomeno interessa zone di piccola superficie, mentre può essere molto costoso se le zone carbonatate occupano una superficie molto più ampia, in quanto la rimozione del calcestruzzo interessa anche zone non ancora carbonatate nelle quali si prevede che la carbonatazione possa causare dei danni entro il termine della vita residua richiesta alla struttura. Per ovviare a questo inconveniente sono stati sviluppati dei metodi elettrochimici che hanno l'obiettivo di riportare le armature nelle condizioni di passività senza rimuovere il calcestruzzo che non si è ancora fessurato. Questi metodi si basano sull'applicazione di corrente continua tra l'armatura e un anodo posto sulla superficie del calcestruzzo.

Il principio che si basa sulla riduzione del contenuto di umidità del calcestruzzo risulta particolarmente efficace quando la struttura si colloca in ambienti con una percentuale di umidità abbastanza elevata o in presenza di cicli di asciutto/bagnato. L'intervento consiste nella sostituzione del solo calcestruzzo fessurato o danneggiato e nell'applicazione sulla superficie dello stesso di un trattamento idrorepellente o impermeabile, che impedisce l'assorbimento dell'acqua dall'ambiente portando di conseguenza ad una diminuzione del contenuto di umidità del calcestruzzo e della velocità di corrosione delle armature. Con il passare del tempo l'efficacia del rivestimento si riduce per cui deve essere periodicamente rinnovato [5].

Dalla discussione dei risultati presentata nel capitolo 5 si è concluso che la struttura in oggetto presenta un avanzato stato di degrado causato principalmente dalla corrosione da parte dei cloruri, presenti già nella composizione del calcestruzzo. Pertanto tra le tecniche esposte precedentemente il trattamento che prevede la riduzione dell'umidità del calcestruzzo non risulta efficace, in quanto la velocità di corrosione può rimanere comunque elevata anche quando il contenuto di umidità del calcestruzzo è particolarmente basso. Anche il restauro convenzionale non risulta applicabile, in quanto, per ottenere un risultato duraturo, si dovrebbe rimuovere tutto il calcestruzzo carbonatato e contaminato dai cloruri (vista l'estensione di carbonatazione e penetrazione dei cloruri, questo corrisponderebbe in pratica alla demolizione completa). Quindi la scelta della strategia ricade nell'applicazione di una delle tecniche elettrochimiche che hanno come obiettivo quello di riportare le armature nelle condizioni di passività e di conseguenza bloccare il processo anodico.

## 6.1 SCELTA DELLA TECNICA

Una volta definita la strategia dell'intervento da utilizzare si procede con l'analisi dell'applicazione delle diverse tecniche elettrochimiche nel caso specifico della zona delle *terme centrali* del sito archeologico e, confrontando diversi aspetti, si attua la tecnica di restauro più adatta.

L'utilizzo delle tecniche elettrochimiche prevede l'applicazione di una corrente continua tra un anodo, posizionato generalmente sulla superficie esterna del calcestruzzo, e le armature che funzionano da catodo. L'anodo è rappresentato da un elettrodo che, collegato al polo positivo di un generatore di corrente continua, ha la funzione di erogare corrente alle armature che vengono collegate al polo negativo. La corrente che circola produce degli effetti positivi e, in alcuni casi, negativi. Tra gli effetti positivi si riscontra un abbassamento del potenziale che implica una riduzione della velocità di corrosione delle armature e la produzione di alcalinità. Infine anche la migrazione degli ioni presenti nella pasta cementizia provocano una circolazione di corrente; pertanto gli ioni positivi, come  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ , si muovono verso le armature, mentre gli ioni negativi, come  $\text{OH}^-$  e  $\text{Cl}^-$  migrano in direzione opposta. La circolazione di corrente può produrre anche degli effetti negativi come la reazione alcali-aggregati, stimolata grazie all'aumento del pH e di alcali, che può provocare l'induzione dell'attacco o l'accelerazione dello stesso. Un altro problema che si potrebbe verificare è la perdita di aderenza tra le armature e il calcestruzzo a causa dell'applicazione di densità di corrente elevate per tempi molto lunghi. Infine la produzione di acidità alla superficie anodica può danneggiare la pasta cementizia nell'intorno dell'anodo e se la struttura risulta contaminata dai cloruri si può verificare anche il fenomeno di sviluppo di cloro.

Tra le tecniche elettrochimiche in grado di ristabilire la passività delle armature nel calcestruzzo carbonatato o contaminato dai cloruri vi sono: la rimozione elettrochimica dei cloruri, la rialcalinizzazione elettrochimica e la protezione catodica.

La rimozione elettrochimica dei cloruri e la rialcalinizzazione elettrochimica sono entrambi dei trattamenti temporanei che applicano un'elevata corrente catodica alle armature (1-2  $\text{A/m}^2$ ) per un periodo limitato (qualche settimana o qualche mese). Questi trattamenti prevedono l'applicazione temporanea di un anodo sulla superficie del calcestruzzo e la sua rimozione al termine del trattamento (l'elettrolita anodico è costituito da polpa di cellulosa imbevuta di una soluzione alcalina). La corrente imposta durante i trattamenti produce alcalinità attorno alle armature (rialcalinizzando così il calcestruzzo carbonatato) e determina il trasporto di ioni (allontanando i cloruri dalla superficie delle armature). Al termine del trattamento, quindi, le armature si trovano in calcestruzzo alcalino e con un ridotto tenore di

cloruri [5]. Queste tecniche sono interessanti per le strutture dei beni culturali, in quanto il sistema anodico viene rimosso finito il trattamento e il calcestruzzo originale viene conservato anche in superficie (tranne le zone in cui sono stati effettuati dei rappezzi per rimediare ai distacchi di calcestruzzo già verificatisi). Il principale problema è legato alla durata della protezione offerta alle armature, che può essere nel tempo compromessa a causa di ulteriore penetrazione di carbonatazione e cloruri. Inoltre la rimozione elettrochimica dei cloruri risulta una tecnica abbastanza ardua da impiegare nel nostro caso, in quanto l'elevata concentrazione di cloruri anche in profondità rende difficile l'operazione di rimozione. E', infatti, noto che questa tecnica può rimuovere facilmente i cloruri nello spessore di copriferro, ma più difficilmente è in grado di allontanare i cloruri presenti oltre le armature.

Quindi, nella zona delle *terme centrali* del sito archeologico di Nora a Pula, la tecnica migliore da applicare alle strutture in calcestruzzo armato, che risultano già interessate dalla corrosione causata principalmente dai cloruri, è la protezione catodica. Questa tecnica consente, mediante una permanente applicazione della corrente, di proteggere le armature nel tempo. La corrente di protezione può essere regolata per garantire la protezione necessaria in funzione del contenuto di cloruri e delle condizioni di esposizione ambientale.

### **6.3 PROGETTO DELLA PROTEZIONE CATODICA**

Attraverso la protezione catodica è possibile ridurre la velocità di corrosione delle barre d'armatura portandole di nuovo in condizioni di passività. La protezione catodica agisce in modo diverso a seconda che la corrosione sia dovuta alla presenza di cloruri o alla carbonatazione [13]. Nel caso delle strutture in oggetto, essendo presenti entrambe le cause di degrado, devono essere considerati entrambi i meccanismi.

Per quanto riguarda la contaminazione di cloruri, si può fare riferimento al diagramma di Pedefferri mostrato in figura 6.1 dove sono indicati i diversi domini di potenziale e contenuto di cloruri nei quali si può verificare l'inizio e la propagazione dell'attacco corrosivo per pitting causato dai cloruri. Le regioni individuate in questo diagramma risultano però indicative, in quanto i contorni dipendono da diversi fattori come il pH del calcestruzzo e la temperatura.

Nella regione A è rappresentata la zona di corrosione nella quale l'attacco corrosivo può innescarsi e propagare stabilmente. Il limite inferiore di questa zona è definito dal potenziale di pitting ( $E_{pit}$ ), cioè il potenziale in corrispondenza del quale la corrosione si può innescare per un determinato contenuto di cloruri. La regione B invece indica la zona di passività imperfetta, dove l'attacco non si può innescare, ma se si è già innescato può propagare.

Questa zona è limitata inferiormente dal potenziale di protezione ( $E_{pro}$ ), in corrispondenza del quale, per un determinato tenore di cloruri, le armature rese attive dall'innescò dell'attacco corrosivo possono ripassivarsi. La zona di passività perfetta è rappresentata dalla regione C, nella quale l'attacco non può né innescarsi e né propagare. Infine la regione D indica la zona di immunità, dove la corrosione non si può innescare per motivi termodinamici.

Utilizzando la protezione catodica il potenziale dell'armatura in una struttura esposta alla penetrazione dei cloruri segue il percorso mostrato nella figura 6.1. Si parte dalla condizione iniziale di corrosione indicata dal punto 1, dove l'acciaio è passivo e il contenuto di cloruri è nullo. All'aumentare del contenuto di cloruri nel calcestruzzo a contatto con le armature, anche se il potenziale rimane invariato, si raggiunge la zona di corrosione per pitting nel punto 2. Con l'applicazione della protezione catodica si registra una diminuzione del potenziale ed il sistema viene portato ad operare in condizioni di passività perfetta nel punto 3, dove la velocità di corrosione diventa trascurabile [5]. In realtà è sufficiente portarlo nel punto 4, anche se questo si trova nel campo di passività imperfetta, perché in tale condizione la velocità di corrosione è comunque trascurabile.

In calcestruzzo carbonatato la protezione catodica agisce in modo diverso; in questo caso, infatti, la corrente applicata determina una lieve rialcalinizzazione del calcestruzzo attorno all'armatura (grazie alla reazione catodica che avviene sulla sua superficie). La rialcalinizzazione di un sottile strato di calcestruzzo attorno all'armatura può determinare la ripassivazione dell'acciaio.

Nel caso specifico, delle strutture, la protezione catodica ha l'obiettivo di ripassivare le armature sia per l'abbassamento di potenziale sia per la produzione di alcalinità. Per eseguire il progetto della protezione catodica alle strutture in calcestruzzo armato danneggiate dalla corrosione da cloruri sono state seguite le specifiche presenti nella norma UNI EN 12696 [14].

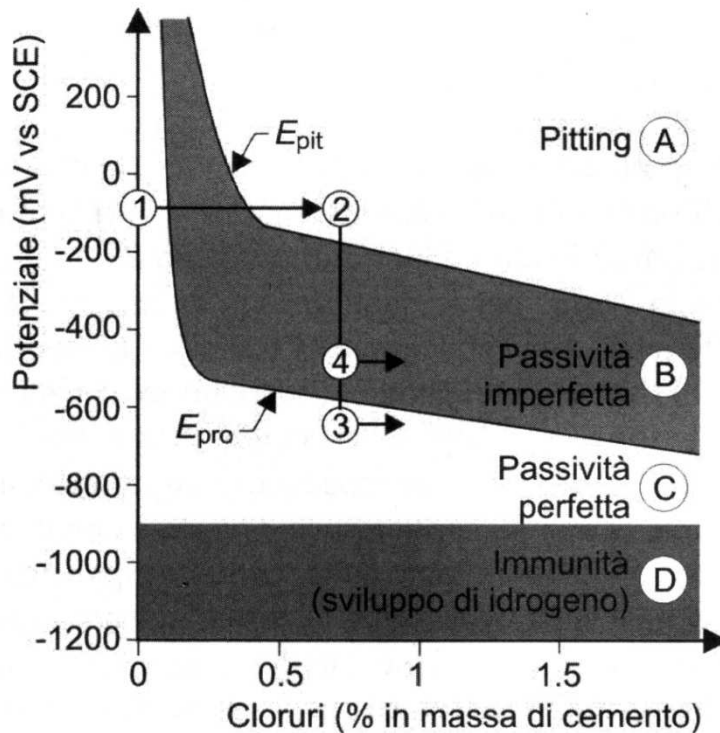


Figura 6.1: Diagramma di Pedefferi, condizioni di innesco e propagazione della corrosione per pitting in un calcestruzzo contenente cloruri, e percorso evolutivo dell'applicazione della protezione catodica [5].

### 6.3.1 CONTROLLI E OPERAZIONI PRELIMINARI

L'analisi delle varie prove effettuate sia in situ che in laboratorio rientrano nei controlli e nelle operazioni preliminari che si devono svolgere per elaborare un progetto di protezione catodica. Pertanto nei capitoli precedenti sono stati esaminati i risultati riguardanti l'ispezione visiva, per individuare il tipo, le cause e l'estensione dei difetti; le caratteristiche dell'ambiente circostante e della struttura, che potrebbero influire sull'installazione e l'efficacia dell'intervento; la determinazione del contenuto di cloruri e la misura della profondità di carbonatazione; nonché la determinazione dello spessore di copriferro e quindi la posizione dell'armatura, per valutare se è presente una sufficiente spaziatura tra anodo e catodo.

#### CONTINUITA' ELETTRICA DELL'ARMATURA

Una delle operazioni preliminari da effettuare prima dell'installazione della protezione catodica riguarda il controllo della continuità elettrica delle armature, che può essere verificata controllando che la resistenza tra due punti qualsiasi delle armature sia stabile e minore di  $1\Omega$ . In alternativa, un controllo più efficace riguarda la tecnica della misura del potenziale tra un elettrodo di riferimento in posizione fissa e variando la connessione elettrica

nei diversi punti delle armature. Anche in questo caso la continuità elettrica è verificata se la lettura del potenziale è costante [15].

In questo caso è stata verificata solo la continuità elettrica delle armature tra il singolo pilastro e la rispettiva trave, senza verificare se le armature delle travi o dei pilastri erano in corto circuito tra di loro. Pertanto si deve assumere che le armature delle travi non siano collegate elettricamente e si prevede di realizzare un contatto elettrico sull'armatura di ogni singolo pilastro o trave, per un totale di quattro contatti elettrici. Infine questi collegamenti devono essere cortocircuitati insieme, per garantire la continuità elettrica delle armature, e collegati all'alimentatore di corrente.

#### PREPARAZIONE DELLA SUPERFICIE DELLA STRUTTURA

In seguito, prima dell'applicazione dell'anodo, risulta necessario procedere con la preparazione della superficie della struttura. Visto che la struttura risulta particolarmente degradata, occorre ripristinare la superficie rimuovendo solo il calcestruzzo non integro (fessurato o in fase di distacco incipiente), mentre il calcestruzzo che risulta meccanicamente sano e fisicamente in buono stato anche se contaminato da cloruri o carbonatato non necessita di essere rimosso.

Infine, per garantire un buon contatto tra l'acciaio e il materiale di riparazione, si procede con la pulizia della superficie dell'armatura, rimuovendo tutti i prodotti della corrosione non aderenti [14,15]

Una volta rimosso tutto il calcestruzzo danneggiato e pulito la superficie dell'armatura si procede con il ripristino del calcestruzzo in conformità con la normativa UNI EN 1504 [16]. Per l'operazione di ripristino si devono utilizzare solo materiali cementizi e nel caso specifico si ritiene che una malta cementizia commerciale per il ripristino di strutture in calcestruzzo armato sia adatta allo scopo. Sarà peraltro necessario verificare che sia di natura cementizia e che eventuali aggiunte polimeriche non determinino una resistività elettrica del materiale saturo dopo stagionatura di 28 giorni superiore a 500  $\Omega\text{m}$ .

Visto che le zone da ripristinare sono di piccole dimensioni e distribuite lungo tutte le superfici delle travi e dei pilastri, si ritiene utile impiegare una malta con comportamento reologico di tipo tissotropico, applicata a cazzuola. Prima della stesura della malta si dovranno sostituire le armature (in genere le staffe) che si sono consumate in seguito alla corrosione. Dovrà essere verificato che in qualsiasi punto le armature siano ricoperte con almeno 15 mm di malta, allo scopo di evitare il corto circuito con l'anodo.

### SCelta DEL SISTEMA ANODICO

Visto che non c'è la necessità di garantire la conservazione della superficie originale del calcestruzzo, in questo caso si ritiene opportuno ricorrere ad un anodo distribuito sulla superficie del calcestruzzo. In questo modo è possibile garantire una distribuzione uniforme della corrente su tutte le armature.

Il sistema costituito da una rete di titanio attivato immersa in uno strato di malta è da preferire ad altri sistemi (ad esempio a base di pitture conduttive) per la sua maggiore durata e affidabilità.

### **6.3.2 DIMENSIONAMENTO DEL SISTEMA DI PROTEZIONE**

In seguito si illustra la procedura generale che è stata utilizzata per il dimensionamento del sistema di protezione catodica utilizzando un sistema a corrente impressa:

- calcolo della superficie a cui si intende applicare la protezione e suddivisione in “zone anodiche” indipendenti, generalmente con una superficie minore di 500 m<sup>2</sup>, ciascuna dotata del proprio sistema di alimentazione. Considerando che la struttura sulla quale andremo ad applicare il sistema di protezione catodica risulta composta da quattro travi e quattro pilastri, è stata calcolata una superficie di calcestruzzo complessiva di 30 m<sup>2</sup> (<<500 m<sup>2</sup>), e pertanto il sistema risulta formato da una sola zona anodica con il corrispondente sistema di alimentazione.
- calcolo della corrente di protezione da applicare all'armatura:  $I_{arm}=i_{arm}*S_{arm}$ , dove  $i_{arm}$  è la densità di corrente massima di protezione dell'acciaio ed  $S_{arm}$  è la superficie dell'armatura. Per questa struttura, che è risultata carbonatata e inquinata dai cloruri, la densità di corrente di protezione dell'acciaio deve essere compresa tra 10 e 20 mA/m<sup>2</sup>, utilizzando in questo dimensionamento il valore massimo. La densità di corrente di protezione rispetto al calcestruzzo, pari a 6 mA/m<sup>2</sup>, è stata calcolata con la seguente formula:  $i_{cls}=(i_{arm}*S_{arm})/S_{cls}$ , dove  $S_{arm}$  e  $S_{cls}$  sono rispettivamente la superficie dell'armatura pari a 8 m<sup>2</sup> e la superficie totale del calcestruzzo pari a 30 m<sup>2</sup>. Tenuto conto della densità di corrente di protezione richiesta da applicare al calcestruzzo, è stato scelto un anodo a rete di titanio attivato, che per tempi molto lunghi distribuisce una densità di corrente massima di 110 mA/m<sup>2</sup> (>6 mA/m<sup>2</sup>). Infine si ottiene che la corrente di protezione da applicare all'armatura risulta pari a 160 mA, e quindi a 0,16 A.
- calcolo della resistenza ohmica dei cavi:  $R_{cavi}=\rho*(L/A)$ , dove  $\rho$  è la resistività del cavo di rame pari a  $1,69*10^{-8}$   $\Omega m$ , L è la lunghezza totale dei cavi prevista pari a 30 metri e A è

l'area della sezione del cavo di rame pari a  $1,5 \text{ mm}^2$ . Si ottiene una resistenza trascurabile di  $0,338 \Omega$ .

- calcolo della resistenza ohmica localizzata all'anodo e al catodo, che per una rete di titanio attivato è fornita dalla seguente formula:  $R_a+R_c=\rho*d/S_a$ , dove  $\rho$  è la resistività del calcestruzzo assunta pari a  $1000 \Omega\text{m}$ ,  $d$  è la distanza tra anodo e catodo che generalmente coincide con lo spessore di copriferro e  $S_a$  è l'area della superficie anodica. Utilizzando uno spessore medio di copriferro pari a  $20 \text{ mm}$ , si ottiene una resistenza pari a  $0,7 \Omega$ .
- calcolo della resistenza ohmica totale, ottenuta sommando la resistenza dei cavi e la resistenza localizzata all'anodo e al catodo, che risulta pari a  $1,038 \Omega$ .
- calcolo della tensione minima di alimentazione:  $V_i=I_{\text{arm}}*R_{\text{tot}}+\psi^*$ , dove  $\psi^*$  è il contributo termodinamico che per la rete di titanio attivato nel calcestruzzo è circa  $1 \text{ V}$ . In questo caso si ottiene una tensione minima pari a  $1,17 \text{ V}$ .

A favore di sicurezza si prevede di utilizzare un alimentatore che fornisce una tensione di  $10 \text{ V}$  e una corrente di  $1 \text{ A}$ , con una regolazione di  $0,01 \text{ A}$ . Pertanto si è scelto un alimentatore fotovoltaico per protezione catodica, che soddisfa le caratteristiche di tensione e corrente ottenute dal dimensionamento in quanto eroga una corrente di  $2 \text{ A}$  e una tensione di  $48 \text{ V}$ . Questo alimentatore è in grado di operare in zone non servite dalla rete elettrica perché è alimentato da un pannello fotovoltaico. Ad esempio si può fare riferimento al modello BF2/12 prodotto da Micropi Elettronica – divisione protezione catodica [18].

L'anodo, destinato alla distribuzione della corrente di protezione catodica, è formato da una rete di titanio attivato che deve essere distribuito su tutta la superficie di calcestruzzo delle travi e dei pilastri. Su questa rete viene saldato a punti un connettore, costituito da strisce di titanio non attivato, che porta la corrente. Per ogni coppia di pilastro e rispettiva trave è previsto un connettore posizionato sulla faccia posteriore di ogni pilastro e fatto proseguire sulla faccia inferiore della trave. A favore di sicurezza si prevedono due connessioni tra ciascun connettore portacorrente (anodo primario) e il polo positivo dell'alimentatore, per fornire la ridondanza richiesta e ridurre al minimo le cadute di tensione. La rete di titanio e il relativo connettore devono essere fissati alla superficie del calcestruzzo attraverso elementi non metallici e si deve porre particolare attenzione alla prevenzione di corto circuiti tra gli anodi e l'armatura. Per assicurare una corretta distribuzione di corrente ed evitare corto circuiti l'anodo deve essere posto ad una distanza minima di  $15 \text{ mm}$ . Infine, dopo aver verificato l'assenza di corto circuiti, si procede con l'applicazione di uno strato cementizio di copertura appropriato al tipo di anodo installato, costituito da una malta cementizia spessa  $20 \text{ mm}$ , realizzata con un rapporto acqua/cemento pari a  $0,5$  ad esempio MAPEGROUT di



Mapei [19]. La ricopertura con strato cementizio consente di ancorare la rete di titanio al substrato e di garantire la continuità elettrolitica. L'adesione media tra lo strato di ricopertura e il calcestruzzo deve essere maggiore di 1,5 MPa, con un valore minimo di 1,0 MPa.

Infine il collegamento del sistema di protezione catodica all'alimentatore è realizzato collegando al polo negativo l'armatura e al polo positivo la rete di titanio attivato, che costituisce l'anodo [14, 15].

### SISTEMI DI MONITORAGGIO

Un altro elemento chiave negli impianti di protezione catodica è rappresentato dal sistema di monitoraggio, che deve verificare le condizioni di protezione.

In questo caso si è deciso che il sistema di monitoraggio sia costituito da quattro elettrodi di riferimento fissi a doppia giunzione di biossido di manganese ( $MnO_2$ ), applicati in punti rappresentativi dell'intera struttura e, quindi, si è pensato di posizionare due elettrodi nei pilastri e due elettrodi nelle travi. Per una migliore installazione questi elettrodi vengono inguainati entro una malta cementizia a ritiro controllato. Il potenziale di ogni elettrodo di riferimento deve essere stabile rispetto a un elettrodo standard. I sensori inoltre devono essere sufficientemente robusti da resistere all'installazione e all'esposizione permanente in ambiente altamente alcalino e, di conseguenza, anche i cavi e le giunzioni devono essere resistenti agli alcali. Questi elettrodi, che sono immersi nelle vicinanze dell'armatura, servono per accertare l'efficacia della protezione catodica, attraverso la misurazione del potenziale acciaio/calcestruzzo, e sono collegati ad una strumentazione digitale costituita da un data logger che dispone di ingresso multicanale con sistema di acquisizione dati. La connessione è realizzata collegando al polo negativo i diversi elettrodi e al polo positivo l'armatura. I data logger devono avere un'impedenza di ingresso di almeno 10 M $\Omega$ , una risoluzione di 1 mV entro un intervallo di 2000 mV e un'accuratezza pari a  $\pm 5$  mV. Questa strumentazione viene installata in una postazione fissa, in un contenitore idoneo a sopportare le condizioni ambientali e climatiche del sito dove opera, e funziona come sistema attivo, cioè viene programmata per acquisire i dati ad intervalli definiti.

Infine si devono eseguire dei controlli in conformità al piano di qualità che comprendono la verifica della polarità, della continuità e dell'isolamento di tutti i circuiti effettuate prima delle connessioni all'anodo o all'armatura [14].

La figura 6.2 mostra lo schema di applicazione della protezione catodica alle strutture in calcestruzzo armato presenti nella zona delle *terme centrali* del sito archeologico.

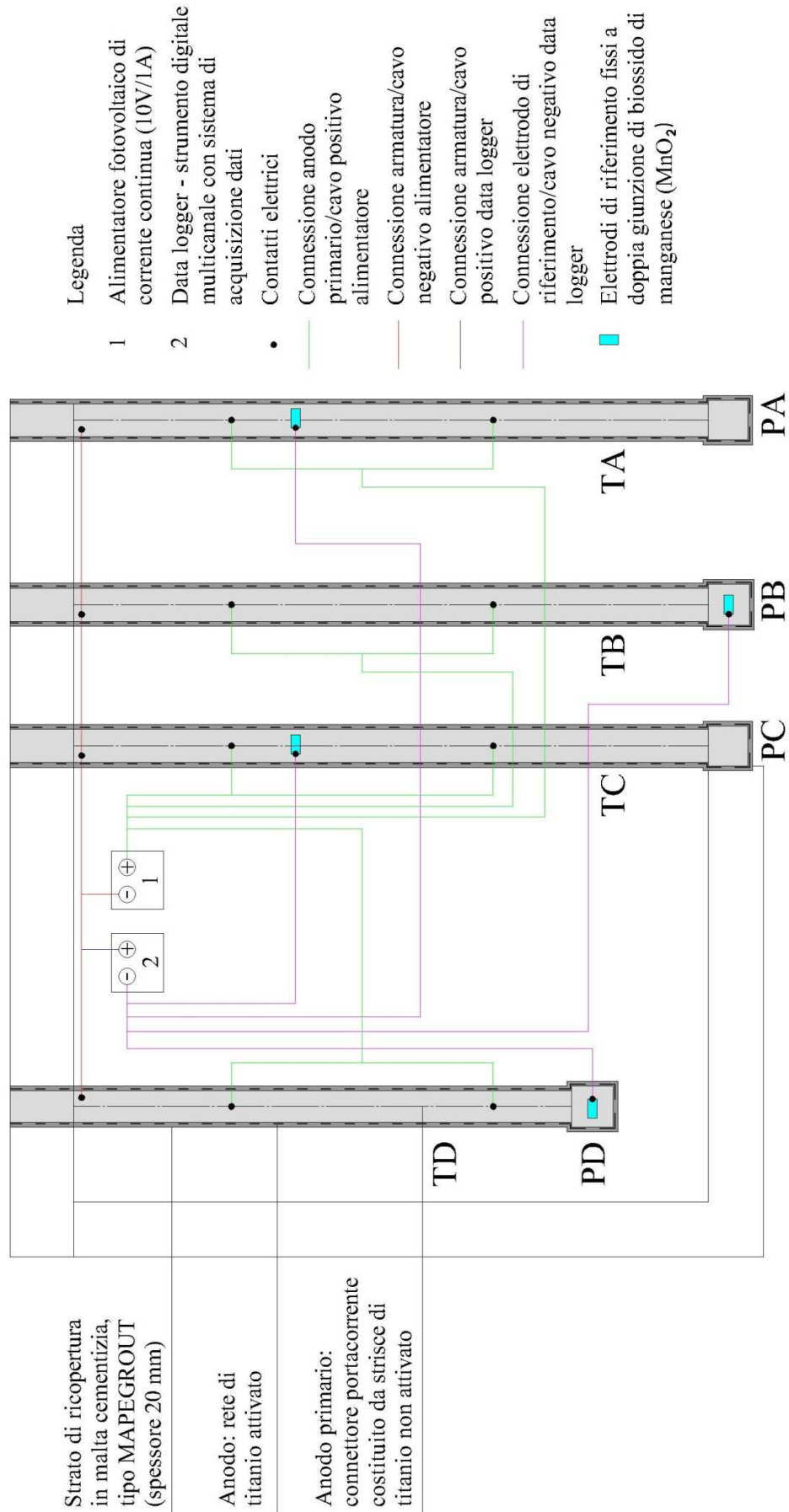


Figura 6.2: Schema di applicazione della protezione catodica alle strutture in calcestruzzo armato presenti nella zona delle *terme centrali* del sito archeologico.

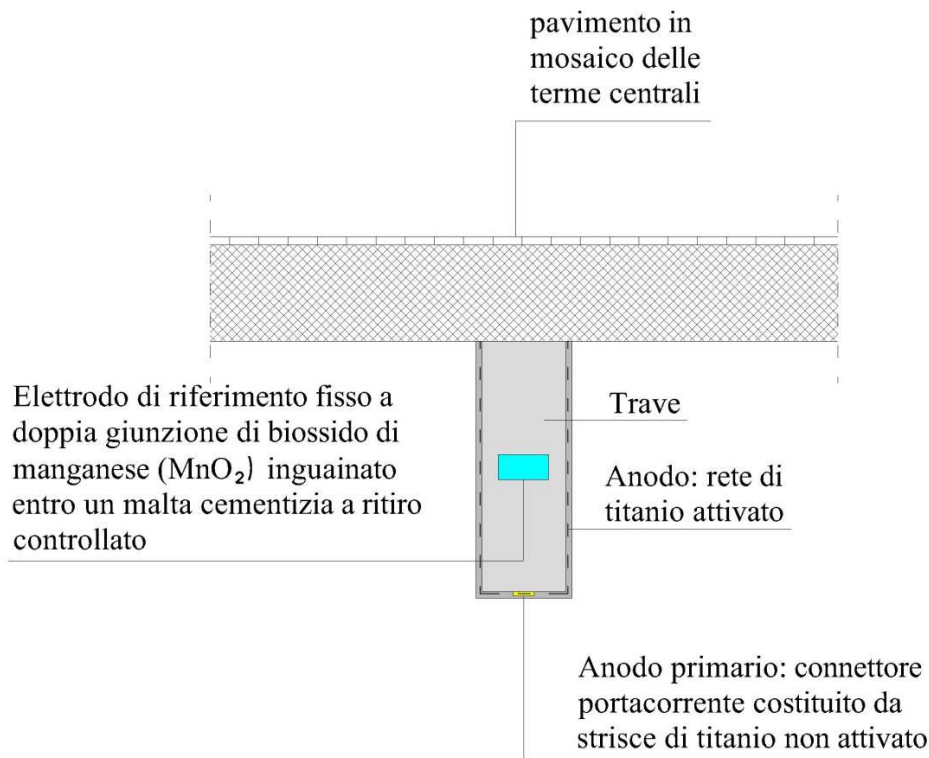


Figura 6.3: Sezione in corrispondenza della trave.

### 6.3.3 AVVIO DELLA PROTEZIONE

Prima dell'avvio della protezione catodica devono essere effettuate delle misure di potenziale tra acciaio e calcestruzzo misurato rispetto agli elettrodi di riferimento fissi e a sonde di polarizzazione; misure di potenziale rispetto a elettrodi di riferimento portatili; misure di potenziale rispetto all'impianto di anodi; indicare ogni dato che deriva da altri sensori che fanno parte del sistema di monitoraggio dell'impianto e la verifica degli impianti di acquisizione elettronica e trasmissione dei dati inserito nel sistema di monitoraggio dell'impianto.

Inoltre prima di avviare l'impianto bisogna assicurarsi che il calcestruzzo di ripristino e lo strato di copertura in malta cementizia siano adeguatamente stagionati (di norma è meglio attendere 28 giorni). L'impianto deve essere applicato con una corrente iniziale che permetta di raggiungere l'efficacia richiesta, pari in questo caso a  $20 \text{ mA/m}^2$  sulla superficie dell'armatura.

Per verificare le condizioni di protezione del sistema, vista la difficoltà di avere letture di potenziale affidabili degli elettrodi di riferimento fissi, si adotta un criterio di protezione empirico, detto "dei 100 mV di depolarizzazione". In base a questo criterio, che misura la variazione del potenziale delle armature nelle quattro ore successive all'avvio del circuito e quindi all'interruzione della protezione, si ritiene che l'armatura sia protetta se la

depolarizzazione supera i 100 mV. Per calcolare questa variazione si deve misurare il potenziale iniziale ( $E_{\text{off}}$ ) immediatamente dopo l'interruzione della corrente, per eliminare i contributi di caduta ohmica, e dopo un tempo variabile da 4 a 24 ore, il potenziale finale ( $E_{\text{finale}}$ ). Si ottengono quindi quattro valori di depolarizzazione, uno per ogni elettrodo installato, e se il valore minimo di depolarizzazione misurato risulta inferiore ai 100 mV non sono soddisfatti i criteri di protezione. In questo caso si devono effettuare ulteriori adeguamenti sulla regolazione della corrente, seguiti da altre ripetizioni della verifica dell'efficacia, effettuate almeno dopo 28 giorni [5,14,15].

Nel caso specifico si è previsto un sistema automatizzato che esegue autonomamente le misure di depolarizzazione a 4 ore e, sulla base del risultato, adatta la corrente di protezione. Il sistema è quindi in grado di autoregolarsi eseguendo periodicamente le prove di depolarizzazione. L'operatore dovrà solo scaricare periodicamente i risultati delle prove di depolarizzazione e controllare che il sistema automatico funzioni.

#### **6.3.4 GESTIONE E MANUTENZIONE**

In seguito le operazioni di gestione e di manutenzione dell'impianto di protezione catodica devono essere effettuate secondo il manuale operativo e di manutenzione.

Nel nostro caso, in cui si è scelto un sistema elettronico di acquisizione dati e di trasmissione elettronica dei dati di monitoraggio, l'ispezione visiva può essere meno frequente in quanto le prove di routine possono essere eseguite in modo automatico.

Le procedure della gestione e della manutenzione dell'impianto riguardano la verifica di funzionamento dell'impianto e la verifica dell'efficacia dell'impianto stesso. Per quanto riguarda la verifica del funzionamento dell'impianto si deve controllare la funzionalità di tutti i sistemi anodici; la misurazione della tensione di uscita e della corrente assorbita da ciascuna zona; e la valutazione dei dati. In genere questa verifica deve essere effettuata una volta al mese nel primo anno di esercizio e, se gli esiti sono soddisfacenti, si passa ad intervalli di tre mesi. Per garantire l'efficacia del sistema, invece, si devono misurare i potenziali "OFF istantanei" polarizzati e la variazione di potenziale; la misurazione dei parametri di ogni altro sensore installato nel sistema di monitoraggio dell'impianto; l'esame visivo dell'impianto di protezione catodica. Di solito questa verifica deve essere effettuata ad intervalli di tre mesi nel primo anno di esercizio del sistema e, se i risultati sono soddisfacenti, a periodi tra sei e dodici mesi [14]. Annualmente dovranno essere verificati gli elettrodi di riferimento (con misure di potenziale rispetto a un elettrodo esterno). Si dovrà inoltre verificare la tenuta dei contatti elettrici e il corretto funzionamento del sistema anodico.

## **CONCLUSIONI**

In questa tesi si è analizzato lo stato di conservazione delle strutture in calcestruzzo e calcestruzzo armato presenti in uno dei siti archeologici più importanti della Sardegna meridionale: il sito archeologico di Nora a Pula. Nella zona archeologica di Nora, collocata sul promontorio di Capo di Pula e lambita dal mare in ogni direzione, a partire dal 1990 a tutt'oggi sono in corso attività di scavo, ricognizione del territorio e studio dei reperti. Dalla letteratura tecnica si sono ricavate informazioni riguardo la costruzione di interventi di sostegno in calcestruzzo realizzati negli anni 1960/70 per la conservazione di importanti reperti archeologici rinvenuti in questa zona, che ad oggi si trovano in avanzato stato di degrado. Il nostro intervento si è basato sull'ispezione visiva del sito e sull'indagine delle cause che hanno provocato il degrado del calcestruzzo presente in questa zona, attraverso prove in situ e in laboratorio.

I risultati ottenuti dalle prove hanno evidenziato che le strutture in calcestruzzo armato che sorreggono i mosaici delle *terme centrali* sono soggette ad un avanzato stato di degrado, causato dalla corrosione delle barre d'armatura. Dalle analisi è emerso che nel calcestruzzo è presente un'alta percentuale di cloruri che ha provocato fin da subito l'inesco della corrosione. I profili dei cloruri analizzati, infatti, raggiungono valori elevati anche a diversi centimetri di profondità, e non presentano il tipico andamento decrescente che si ottiene quando i cloruri penetrano dall'esterno. Quindi è probabile che il calcestruzzo presente in questa zona sia stato confezionato utilizzando materiali già contaminati dai cloruri, come possono essere l'acqua d'impasto e gli aggregati. Ulteriori cloruri possono comunque essere penetrati nel tempo, vista l'esposizione diretta all'ambiente marino. La corrosione promossa dai cloruri ha provocato un attacco di tipo localizzato che ha ridotto notevolmente la sezione dell'armatura delle staffe, come risulta dall'osservazione visiva. Inoltre è stato riscontrato che la profondità di carbonatazione ha raggiunto e superato, in tutti i casi analizzati, lo spessore di copriferro. Questa è un'ulteriore causa di depassivazione delle armature. La concomitanza di cloruri e carbonatazione ha provocato elevate velocità di corrosione sulle armature e distacco di notevoli porzioni di copriferro.

Verificato che tutte le armature sono risultate attive, condizione sufficiente affinché l'attacco corrosivo si inneschi, la velocità di propagazione della corrosione dipende sia dalle condizioni locali di umidità del calcestruzzo sia dal contenuto di cloruri. Infatti le travi che risultano riparate dagli agenti atmosferici non risultano soggette all'espulsione completa dello spessore di copriferro, come viceversa è stato osservato in alcuni pilastri.

Infine dall'evoluzione del degrado è emerso che risulta necessario effettuare un intervento, altrimenti la corrosione continuerà a propagare con elevate velocità e con il rischio che si possano verificare altri distacchi di copriferro. Visto l'importanza di queste strutture che sorreggono i mosaici di epoca punico-romana e che non possono essere sostituite, è necessario un intervento di tipo conservativo che consenta di mantenere e garantire la funzione di supporto dei mosaici. Tenendo in considerazione l'elevata percentuale di cloruri che è stata riscontrata in questa zona, tra le tecniche elettrochimiche mirate al recupero delle strutture danneggiate è stata scelta quella della protezione catodica, in quanto offre una protezione di lunga durata rispetto alle altre tecniche e si può applicare a strutture già interessate dalla corrosione, soprattutto da cloruri.

Il progetto del sistema di protezione catodica è stato realizzato tenendo conto che non ci sono esigenze di conservazione delle strutture in calcestruzzo armato stesse e, in particolare, non c'è alcuna esigenza di garantire la conservazione della superficie originale del calcestruzzo. Si è quindi scelto un sistema anodico distribuito, costituito da una rete di titanio attivato immersa in uno strato di malta cementizia. Si sono quindi progettati sia i dettagli dell'applicazione sia le modalità di gestione e manutenzione del sistema.

# Bibliografia

- [1] Tronchetti C., “Nora” – Sardegna Archeologica, Guide e Itinerari, 1, Carlo Delfino Editore, Sassari, 2001.
- [2] “Nora” – Guida Turistica, R. Balzano Edizioni, Olbia, 2010.
- [3] Jacopo Bonetto, Giovanna Falezza, “Scavi di Nora II, Vent’anni di scavi a Nora – ricerca, formazione, e politica culturale (1990-2009)” – Nora: i prossimi vent’anni? Progetti di conservazione e restauro, Arch. Elena Romoli, Edizioni Quasar, Padova, 2011.
- [4] Pesce G., “Nora: Guida agli scavi”, Edizioni La Zattera, Bologna, 1957.
- [5] L. Bertolini, “Materiali da costruzione” volume II – Degrado, prevenzione, diagnosi, restauro, Ed. Città Studi, Milano, 2012.
- [6] AICAP, “La corrosione nel calcestruzzo: Fenomenologia, prevenzione, diagnosi, rimedi”, Ed. Pubblicità, Roma, 2006.
- [7] P. Pedferri, L. Bertolini, “La durabilità del calcestruzzo armato”, Ed. McGraw-Hill, Milano, 2000.
- [8] ISO 1920-7, “Testing of concrete: Non destructive tests on hardened concrete”, International Standard Organization, 2004.
- [9] ASTM C 805, “Standard test method for rebound number of hardened concrete”, American Standard Testing of Materials, 2002.
- [10] UNI EN 12504-2, “Prove sul calcestruzzo nelle strutture: Prove non distruttive – Determinazione dell’indice sclerometrico”, European Committee for Standardization, 2012.
- [11] EN 12398, “Testing concrete – Non destructive testing – Determination of rebound number”, European Committee for Standardization, 1996.
- [12] ASTM C876, “Standard test method for half cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete”, American Standard Testing of Materials, 1991.
- [13] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, R. Polder, “Corrosion of steel in concrete: Prevention, Diagnosis, Repair”, Wiley – VCH, Weinheim, 2004.
- [14] UNI EN ISO 12696, “Protezione catodica dell’acciaio nel calcestruzzo”, 2012.
- [15] L. Lazzari, P. Pedferri, M. Ormellese, “Protezione catodica”, Ed. Polipress, Milano, 2006.

- [16] UNI EN 1504, “Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo: Definizioni, requisiti, controllo di qualità e valutazione della conformità”, 2009.
- [17] [www.nora.it](http://www.nora.it), visitato il 06/02/2013.
- [18] [www.micropi.com](http://www.micropi.com), visitato il 02/07/2013.
- [19] [www.mapei.com](http://www.mapei.com), visitato il 02/07/2013.



**APPENDICE A**

**RILIEVI GEOMETRICI**  
(le misure sono riportate in centimetri)

**ZONA 1**

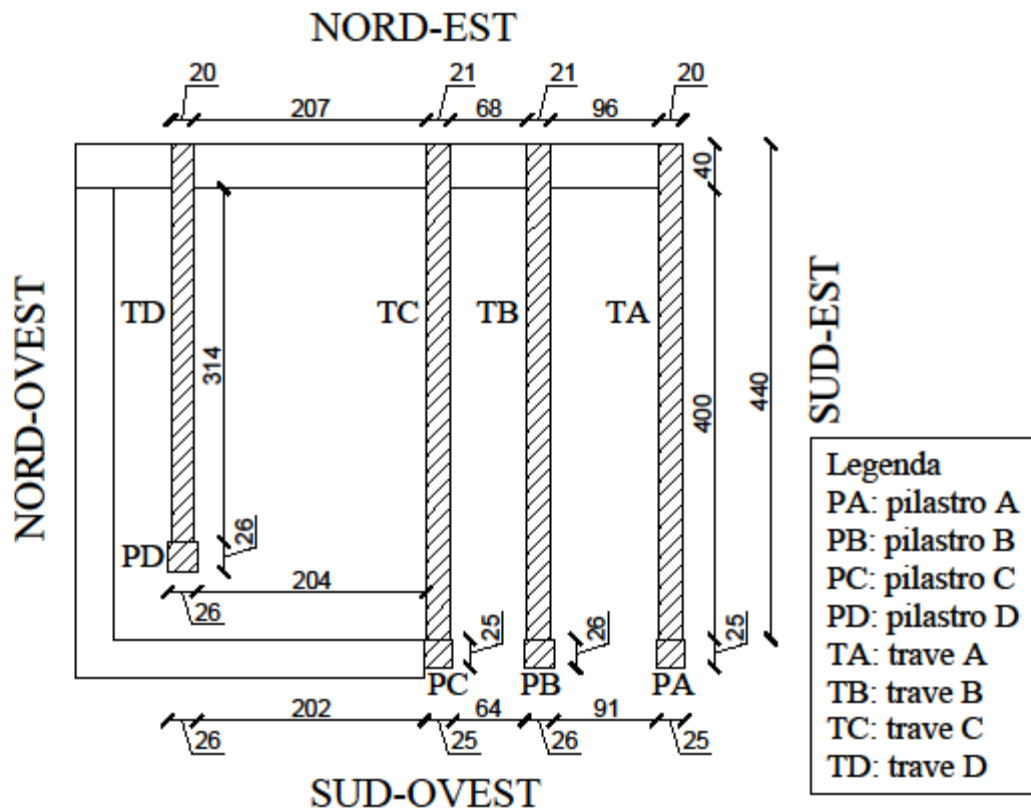


Figura A.1: Area delle *terme centrali* - zona 1 con identificazione degli elementi presi in considerazione.

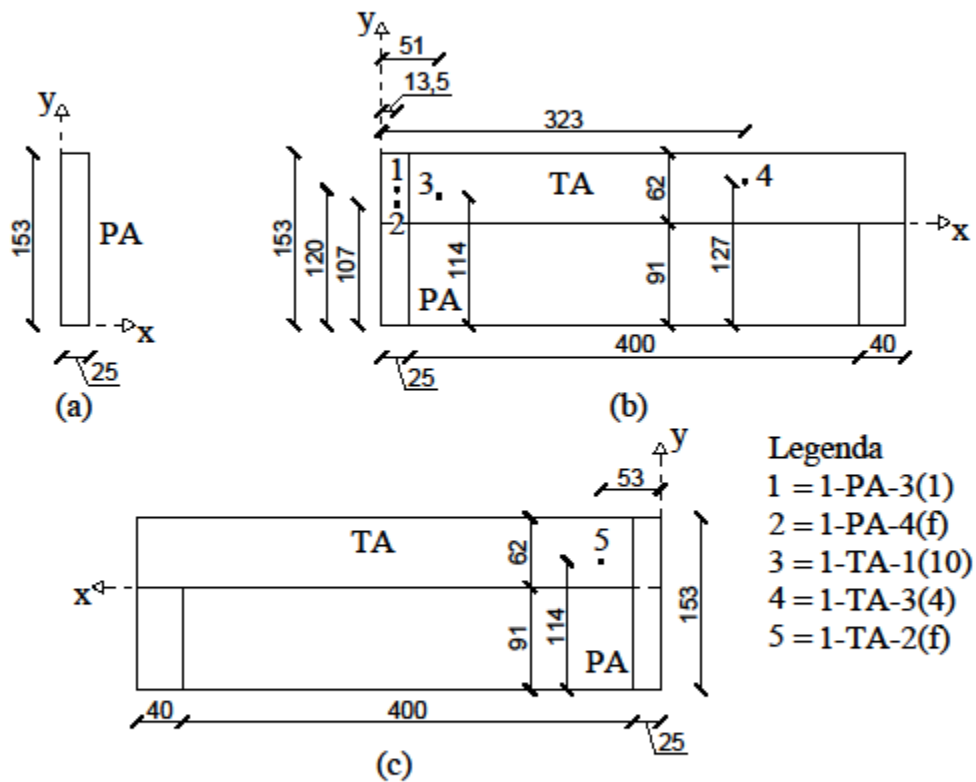


Figura A.2a: Vista del pilastro A lato sud-ovest; b: Vista della trave e del pilastro A lato sud-est; c: Vista della trave e del pilastro A lato nord-ovest, con indicazione dei sistemi di riferimento per le misure e i punti di prelievo dei diversi campioni.

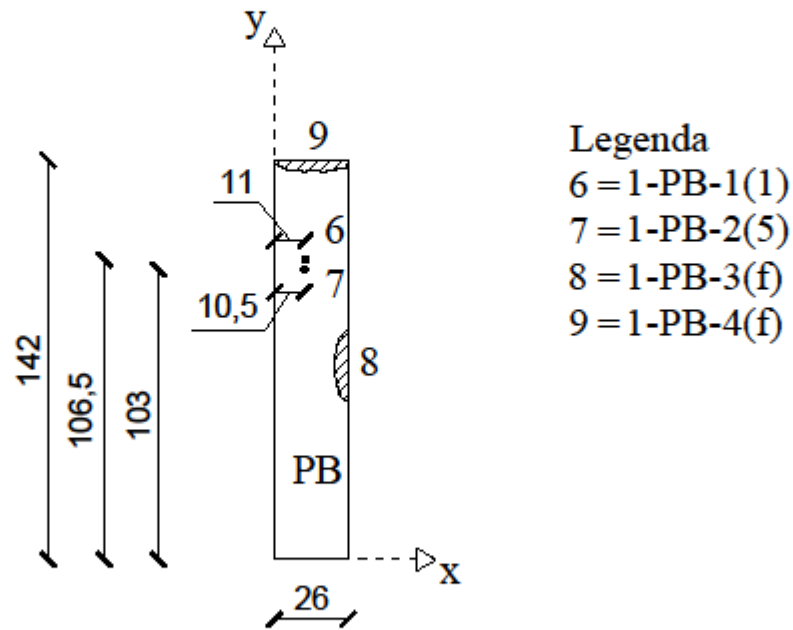


Figura A.3: Vista del pilastro B lato sud-ovest, con indicazione del sistema di riferimento per le misure e i punti di prelievo dei diversi campioni.

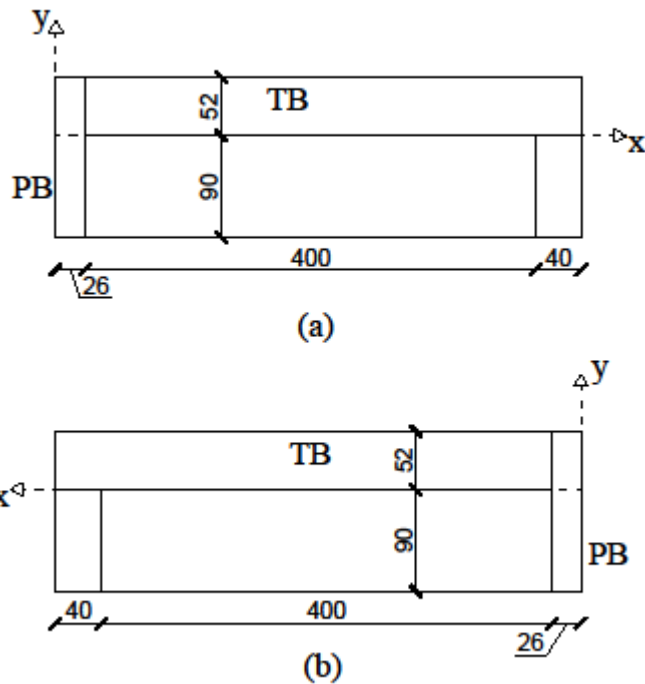


Figura A.4a: Vista della trave e del pilastro B lato sud-est; b: Vista della trave e del pilastro B lato nord-ovest, con indicazione dei sistemi di riferimento per le misure e i punti di prelievo dei diversi campioni.

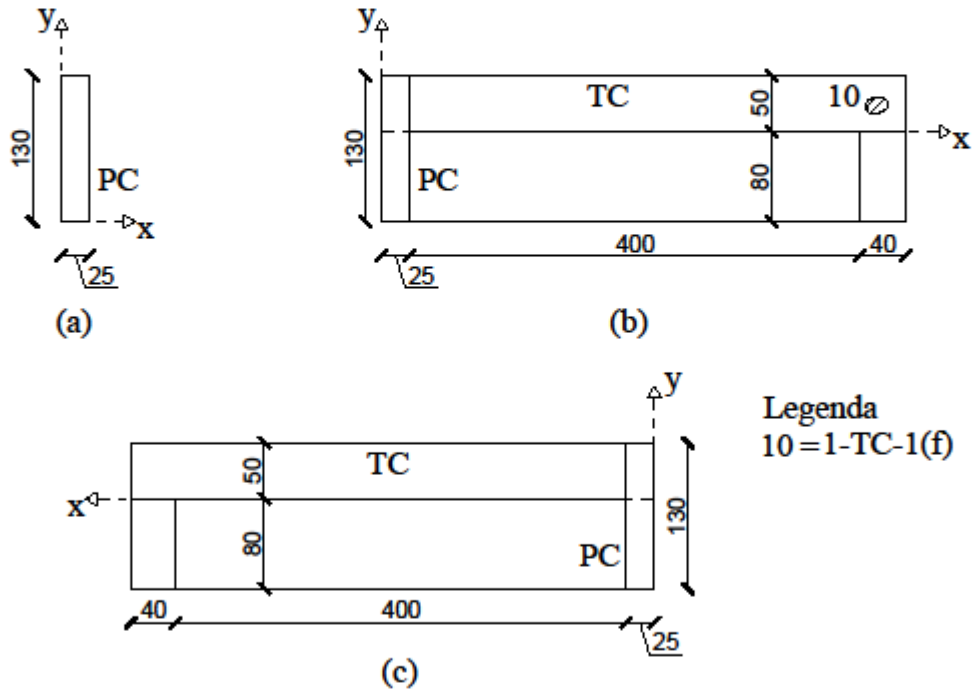


Figura A.5a: Vista del pilastro C lato sud-ovest; b: Vista della trave e del pilastro C lato sud-est; c: Vista della trave e del pilastro C lato nord-ovest, con indicazione dei sistemi di riferimento per le misure e i punti di prelievo dei diversi campioni.

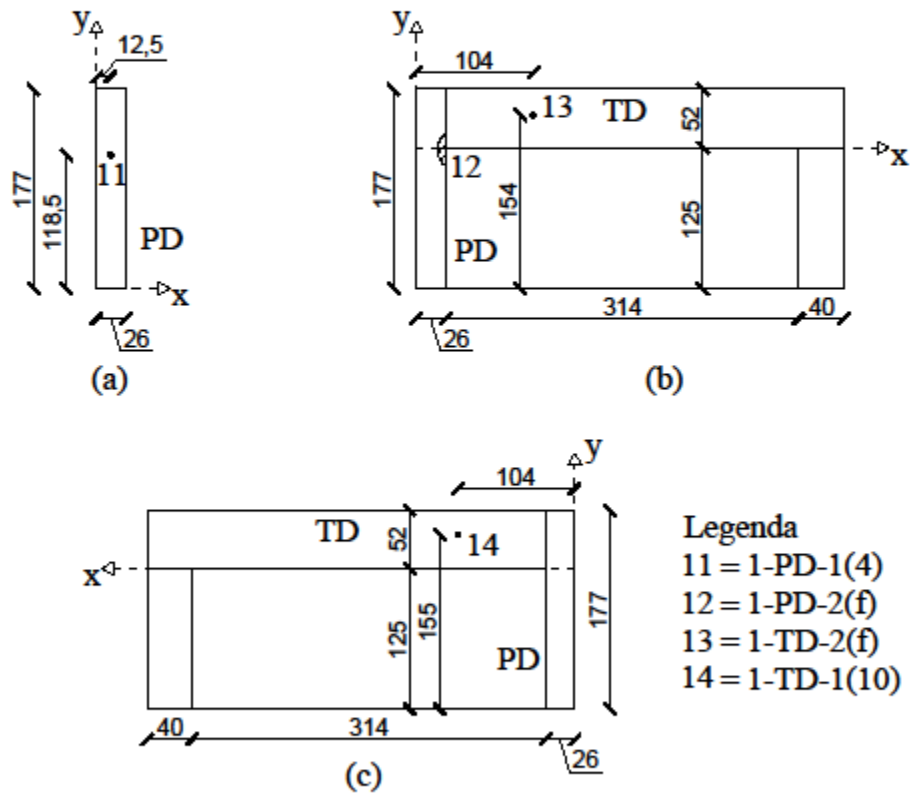


Figura A.6a: Vista del pilastro D lato sud-ovest; b: Vista della trave e del pilastro D lato sud-est; c: vista della trave e del pilastro D lato nord-ovest, con indicazione dei sistemi di riferimento per le misure e i punti di prelievo dei diversi campioni.

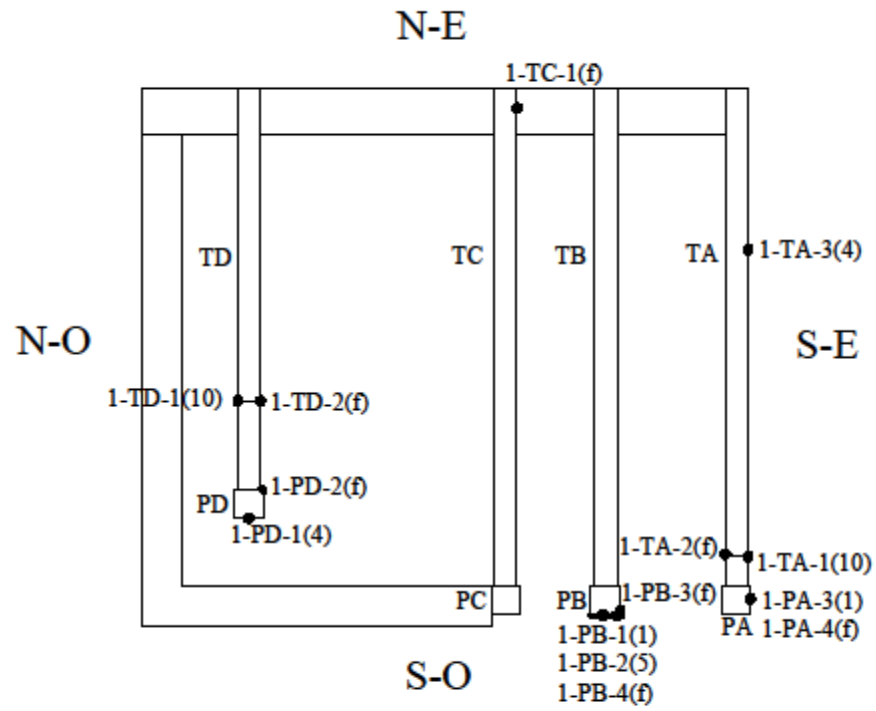


Figura A.7: Area delle *terme centrali* – zona 1 con indicazione dei punti di prelievo dei campioni nei diversi elementi.

**ZONA 2**

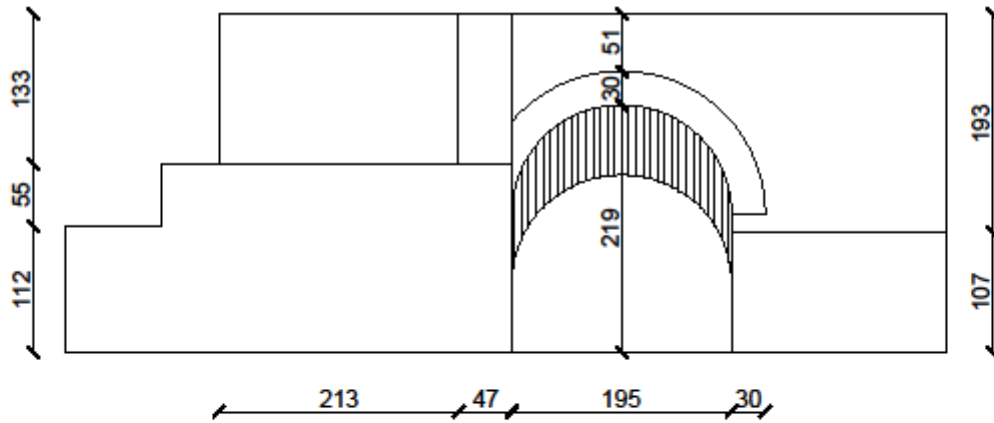


Figura A.8: Prospetto del lato nord dell'entrata esterna al *teatro*.

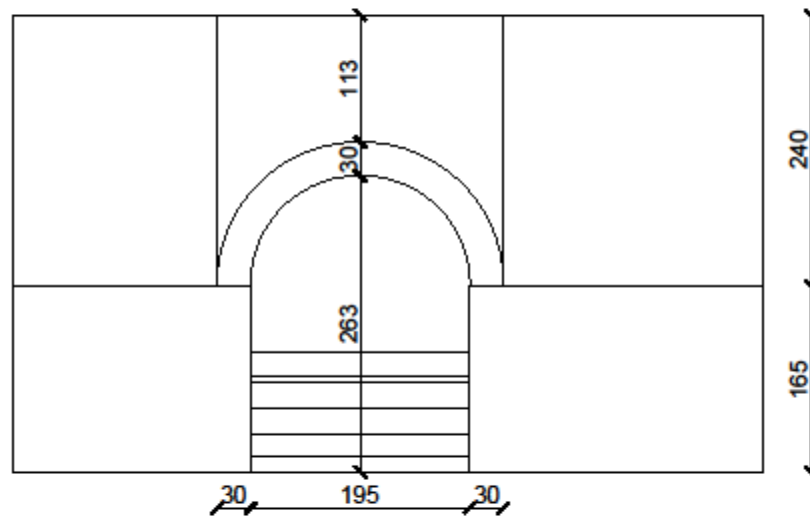


Figura A.9: Prospetto del lato sud dell'entrata interna al *teatro*.

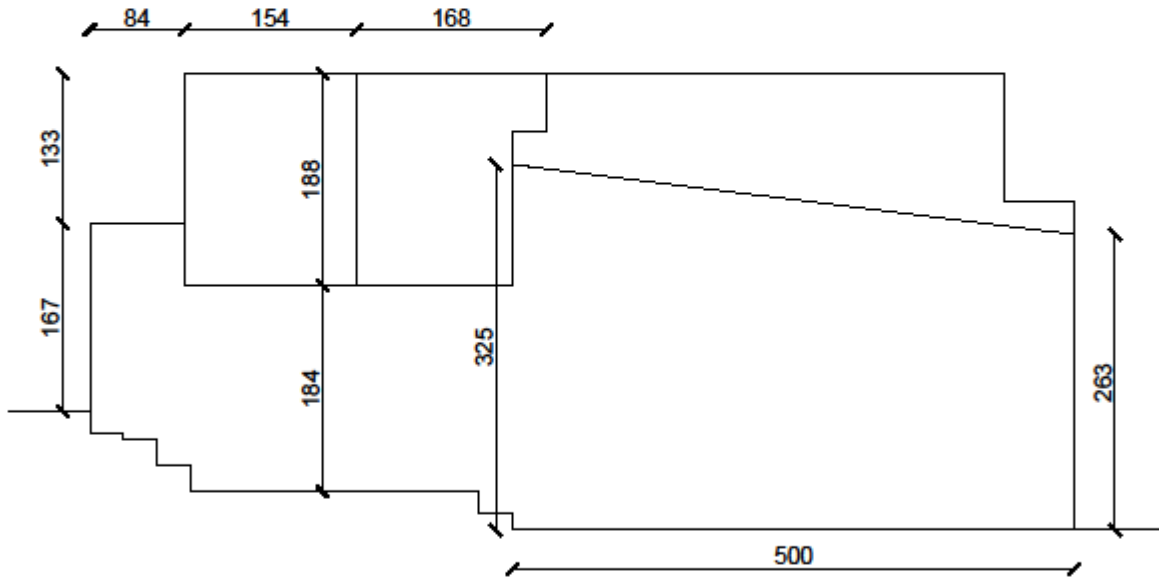


Figura A.10: Prospetto del lato ovest (sezione) dell'entrata al *teatro*.

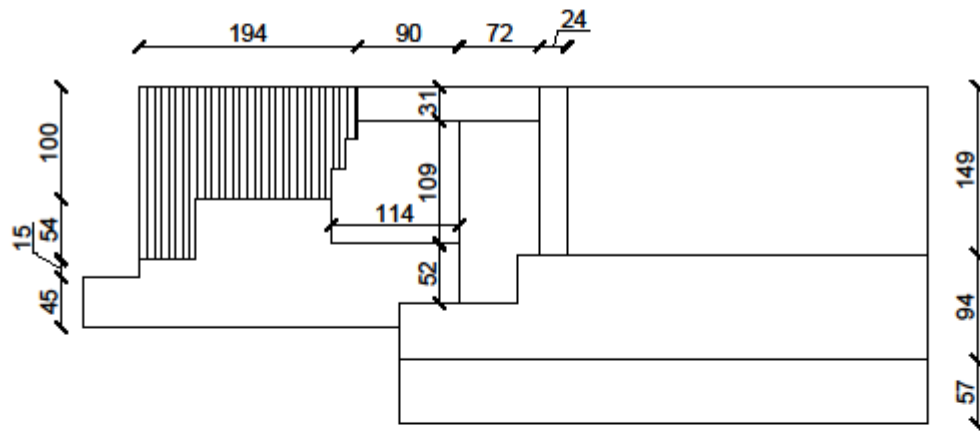


Figura A.11: Prospetto del lato est dell'entrata al *teatro*.

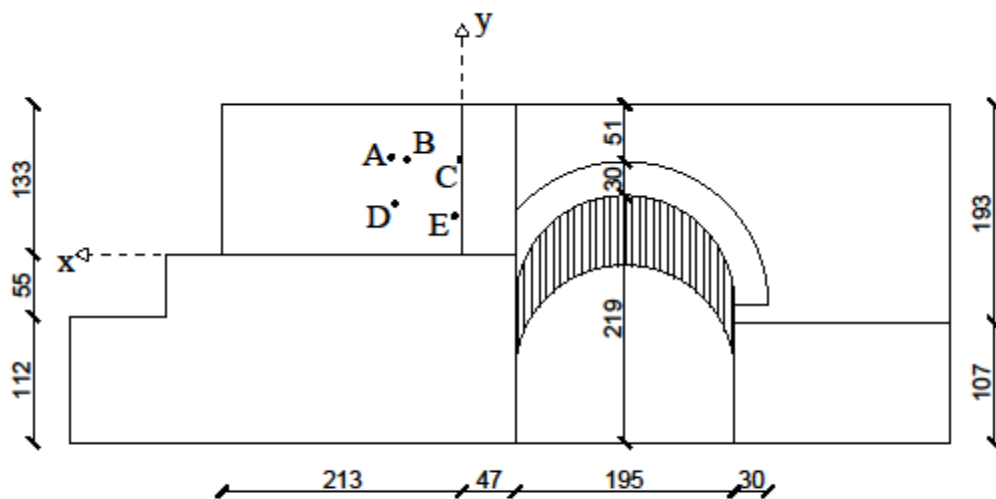


Figura A.12: Prospetto del lato nord dell'entrata esterna al *teatro* con indicazione dei punti in cui si è misurato il potenziale e relativo sistema di riferimento.

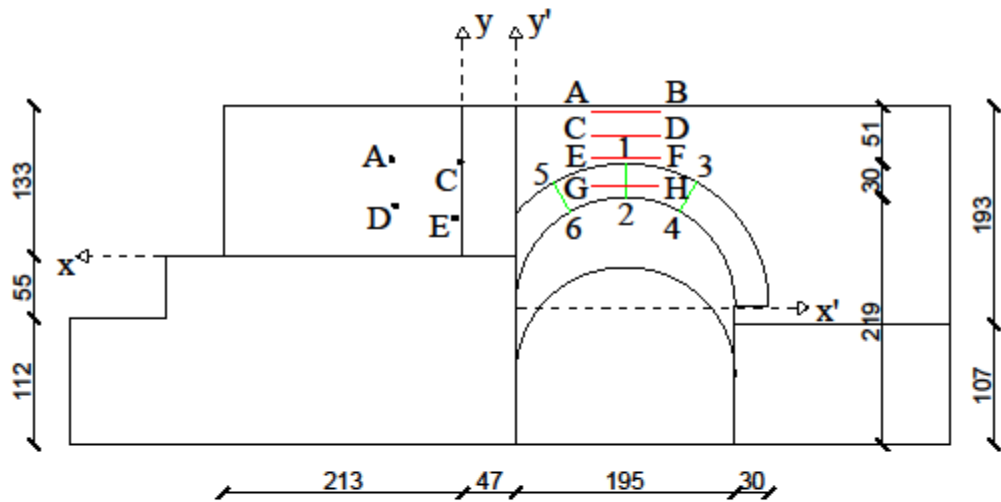


Figura A.13: Prospetto del lato nord dell'entrata al *teatro*, con indicazione dei punti in cui si è misurata la conduttanza e relativo sistema di riferimento.

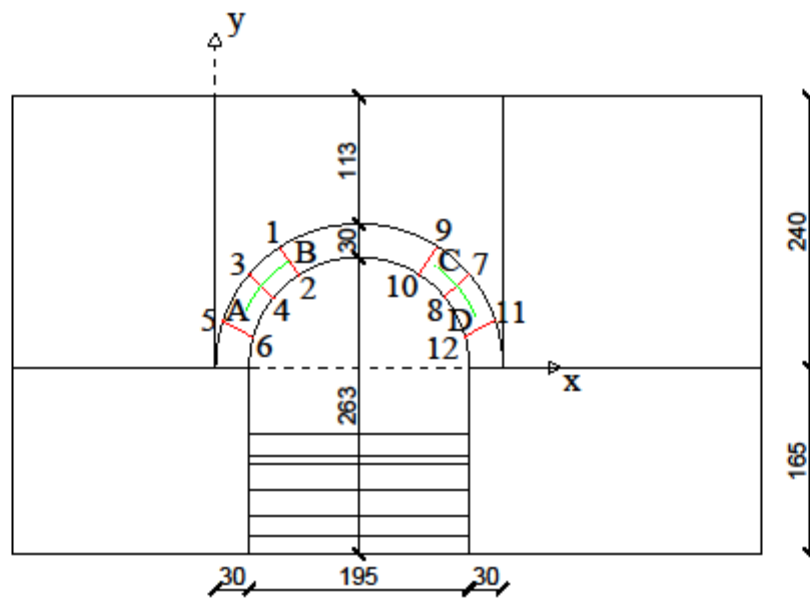


Figura A.14: Prospetto del lato sud dell'entrata al *teatro*, con indicazione dei punti in cui si è misurata la conduttanza e relativo sistema di riferimento.



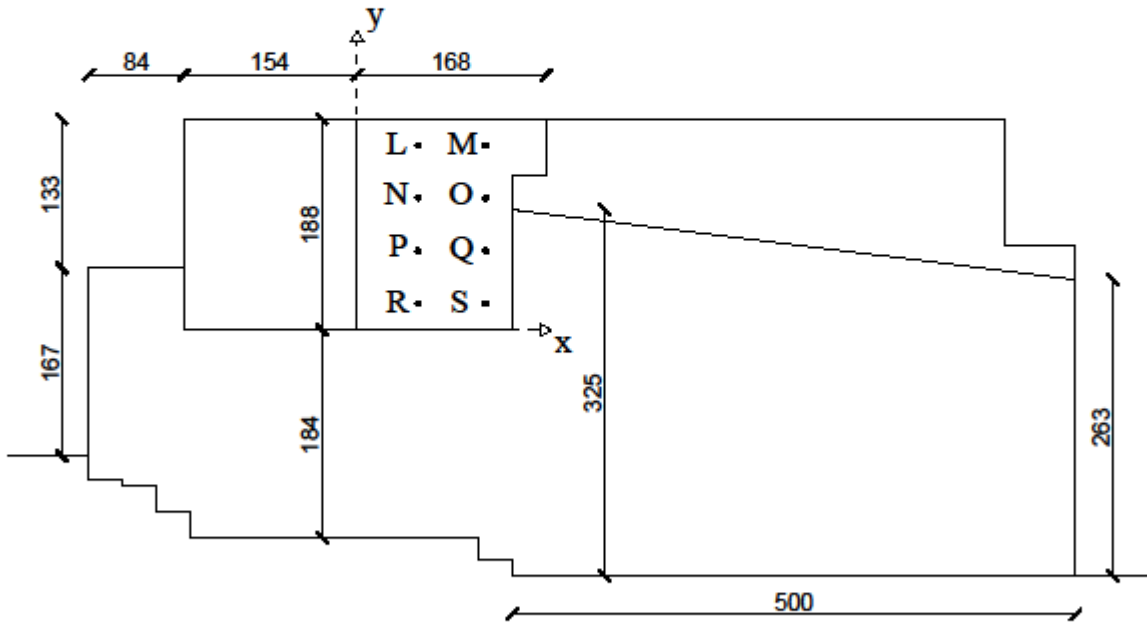


Figura A.15: Prospetto del lato ovest dell'entrata al *teatro*, con indicazione dei punti in cui si è misurata la conduttanza e relativo sistema di riferimento.

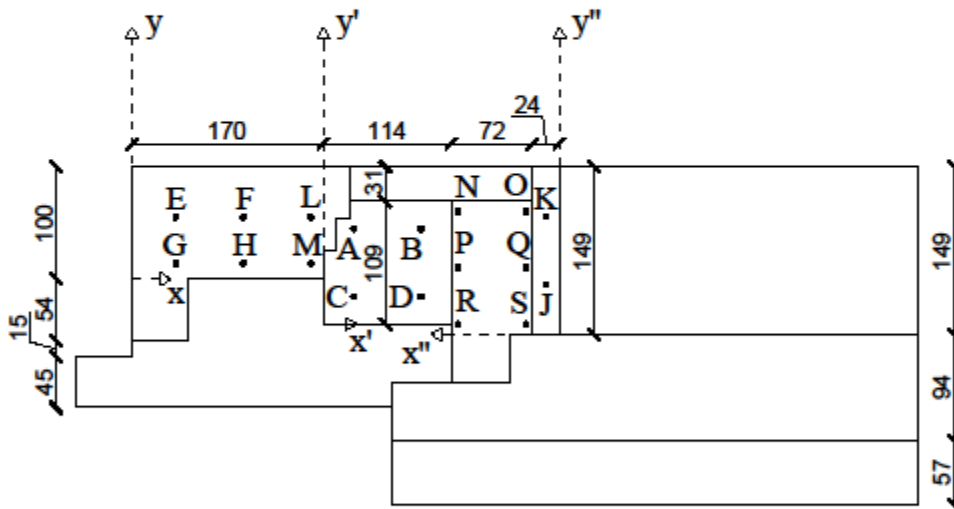


Figura A.16: Prospetto del lato est dell'entrata al *teatro*, con indicazione dei punti in cui si è misurata la conduttanza e relativo sistema di riferimento.

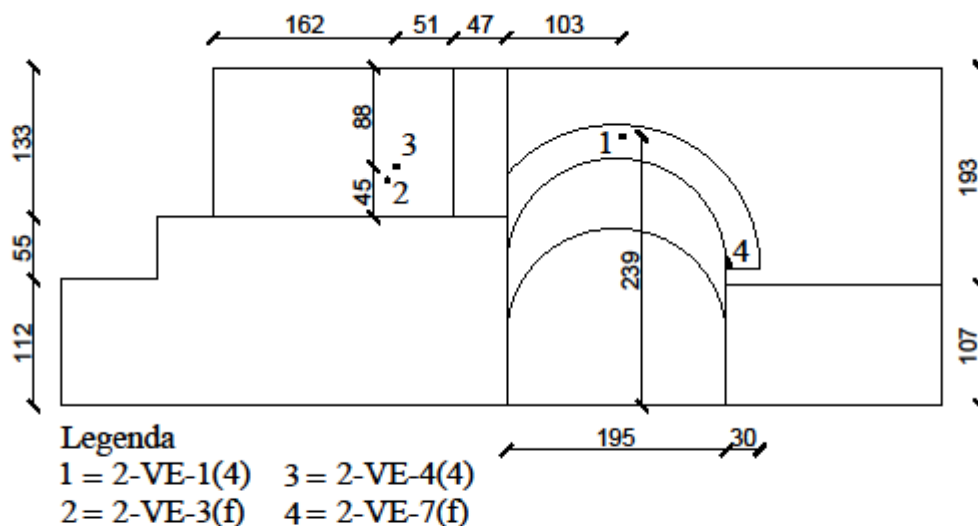


Figura A.17: Prospetto del lato nord dell'entrata al *teatro*, con indicazione dei punti in cui si sono prelevati i campioni.

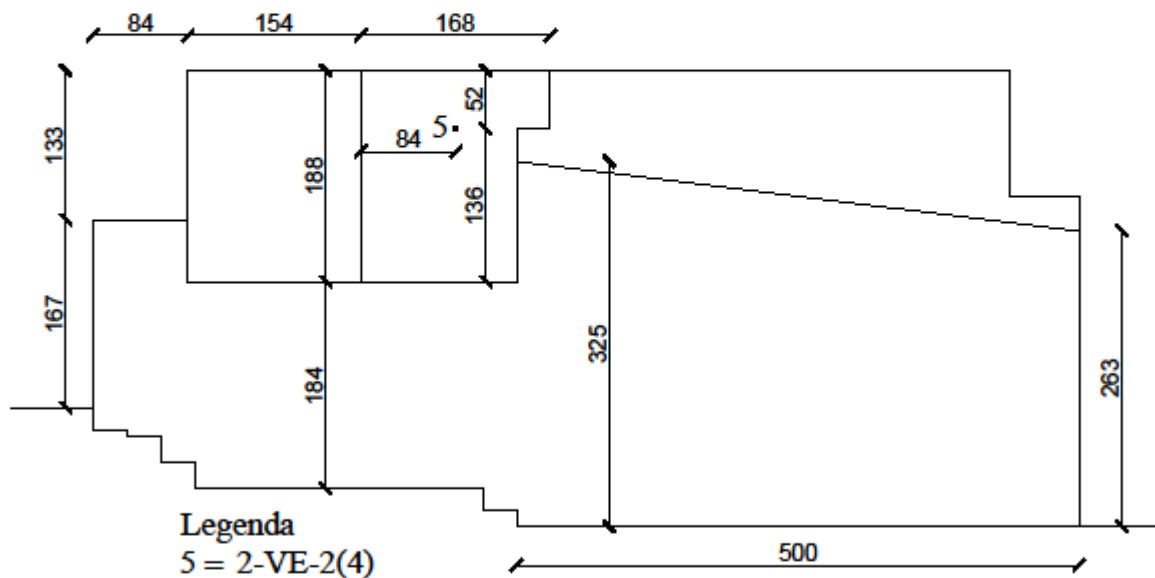


Figura A.18: Prospetto del lato ovest dell'entrata al *teatro*, con indicazione del punto in cui si è prelevato il campione.

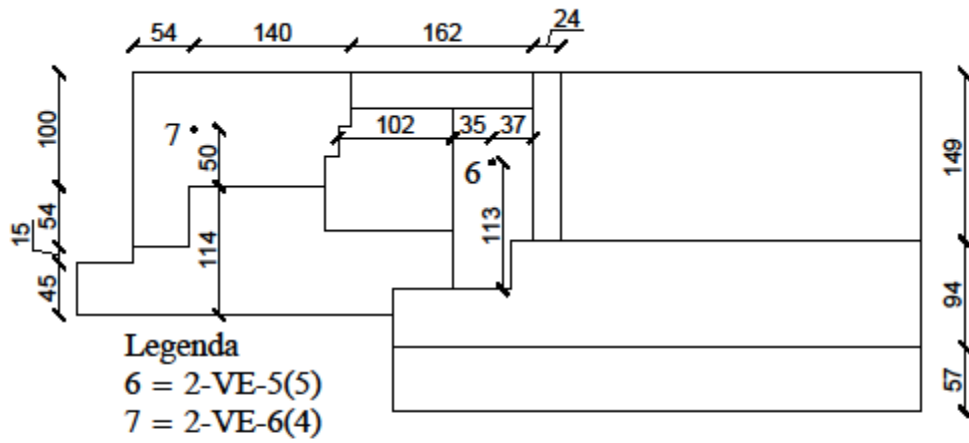


Figura A.19: Prospetto del lato est dell'entrata al *teatro*, con indicazione dei punti in cui si sono prelevati i campioni.

**ZONA 3**

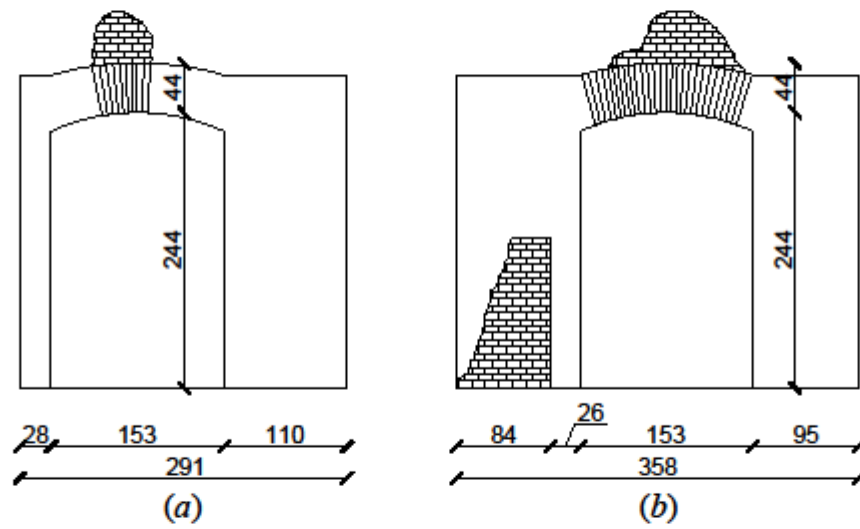


Figura A.20: Prospetti dell'entrata al *frigidarium* delle *terme a mare* – zona 3, *a*: lato nord; *b*: lato sud.

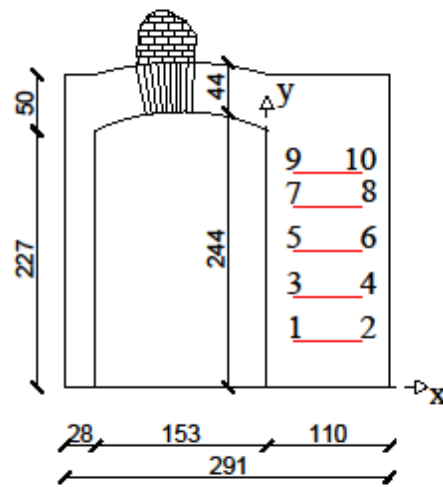


Figura A.21: Prospetto del lato nord dell'entrata al *frigidarium*, con indicazione dei punti in cui si è misurata la conduttanza.

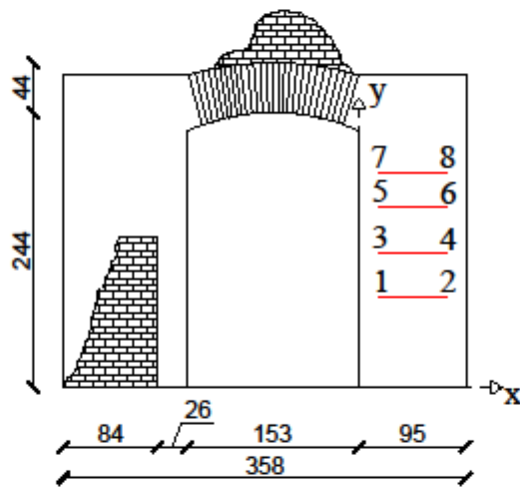


Figura A.22: Prospetto del lato sud dell'entrata al *frigidarium*, con indicazione dei punti in cui si è misurata la conduttanza.

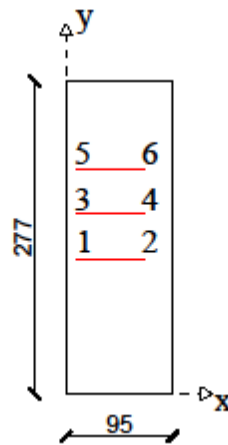


Figura A.23: Prospetto del lato ovest dell'entrata al *frigidarium*, con indicazione dei punti in cui si è misurata la conduttanza.

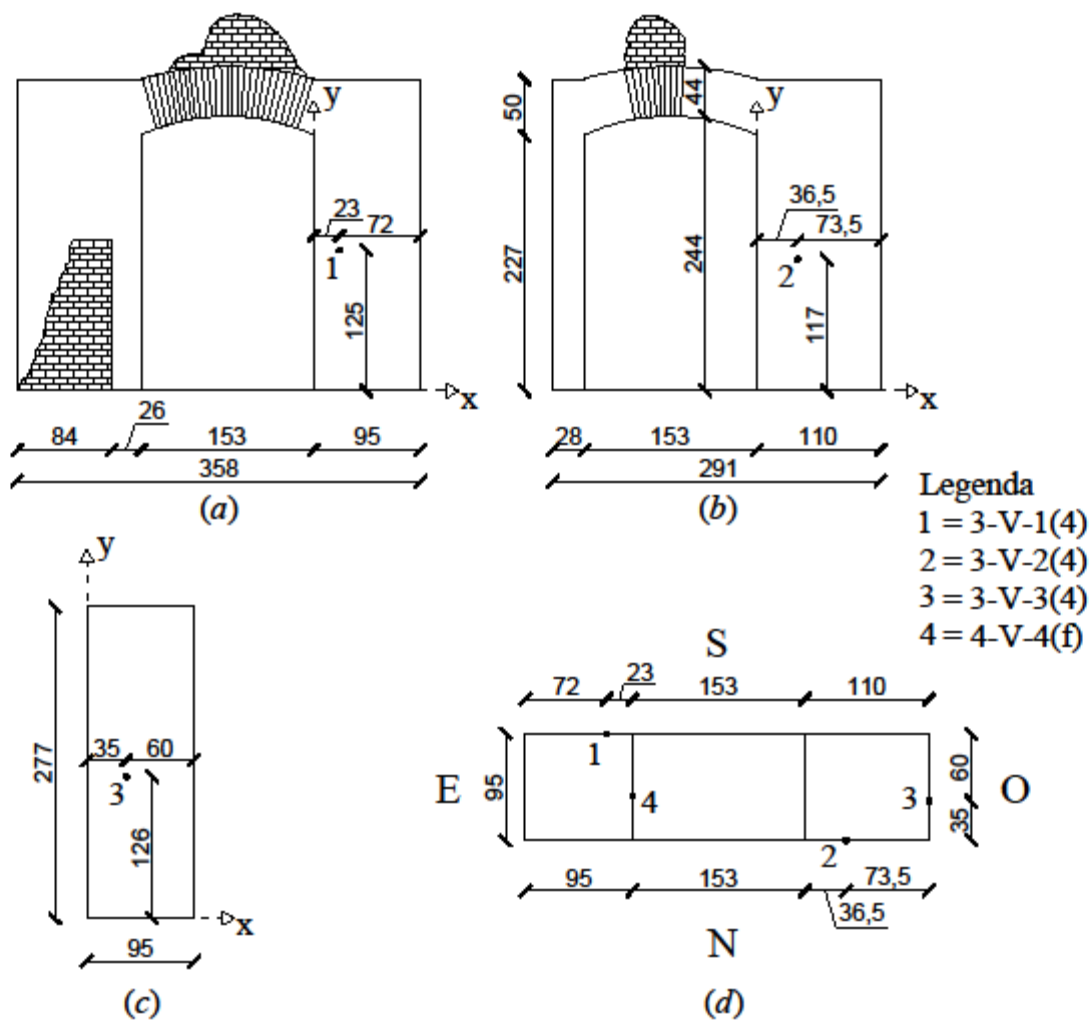


Figura A.24: Rilievo geometrico che riporta, *a*: il prospetto del lato sud; *b*: il prospetto del lato nord; *c*: il prospetto del lato ovest; *d*: la pianta del *frigidarium* delle *terme a mare* con indicazione dei punti di prelievo dei campioni.

**ZONA 4**

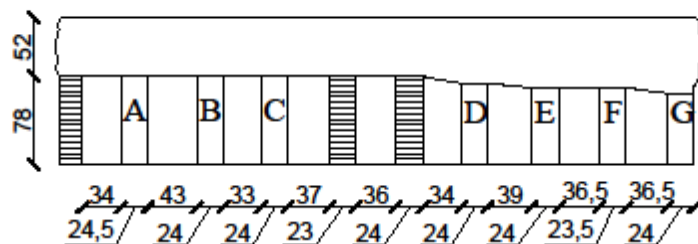


Figura A.25: Prospetto del corpo est sul lato ovest del *calidarium* delle *terme a mare* – zona 4.

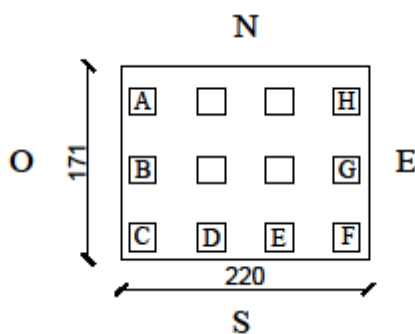


Figura A.26: Pianta del corpo nord del *calidarium* delle *terme a mare* – zona 4, con l'indicazione dei pilastri.

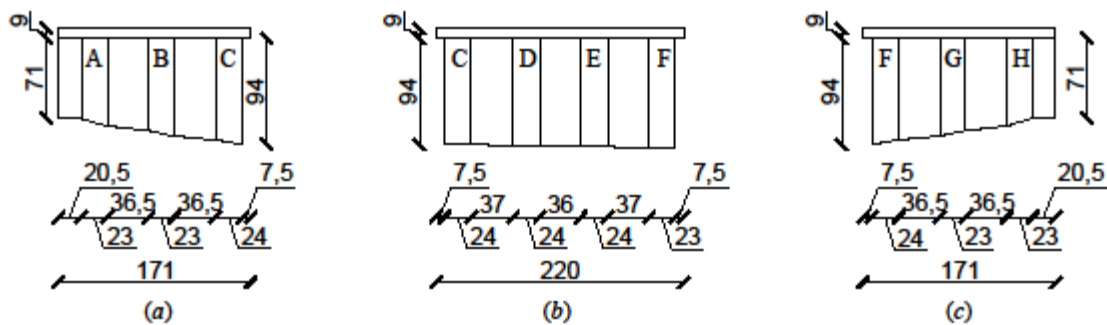


Figura A.27: Rilievo geometrico che riporta, *a*: il prospetto del lato ovest; *b*: il prospetto del lato sud; *c*: il prospetto del lato est del corpo nord del *calidarium* delle *terme a mare* – zona 4.

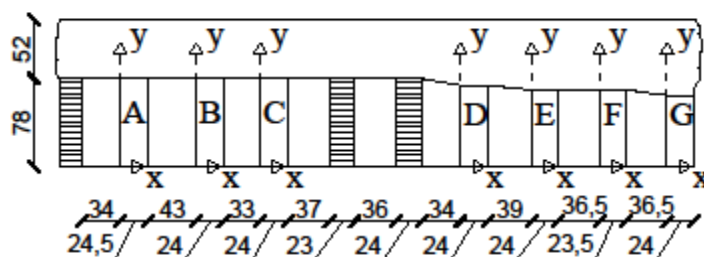


Figura A.28: Prospetto del corpo est sul lato ovest del *calidarium* delle *terme a mare* – zona 4, con l’indicazione del sistema di riferimento utilizzato per le misure del potenziale e della conduttanza.

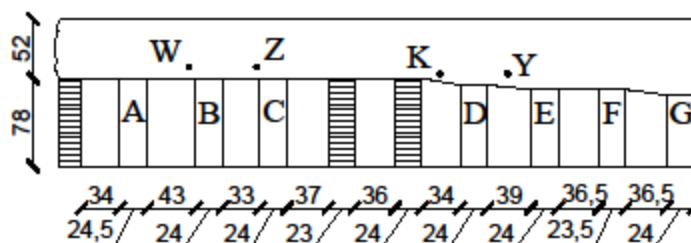


Figura A.29: Prospetto del corpo est sul lato ovest del *calidarium* delle *terme a mare* – zona 4, con l’indicazione dei punti in cui è stata effettuata la misura della conduttanza.

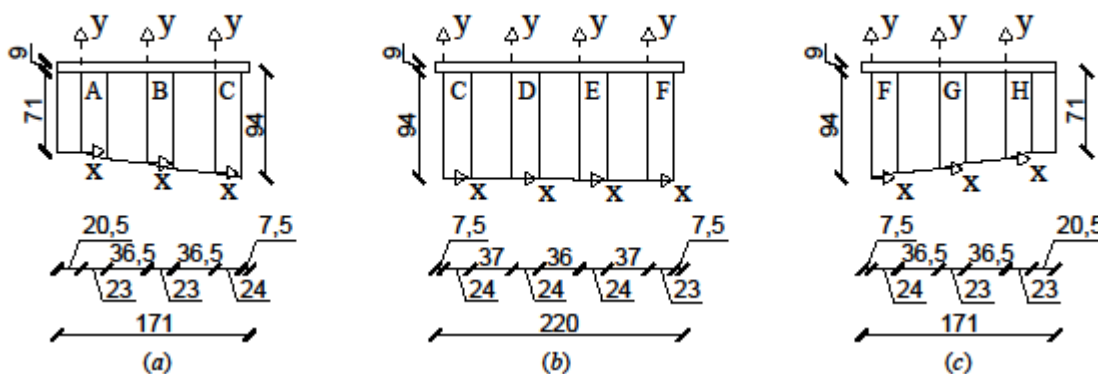


Figura A.30: Rilievo geometrico che riporta, *a*: il prospetto del lato ovest; *b*: il prospetto del lato sud; *c*: il prospetto del lato est del corpo nord del *calidarium* delle *terme a mare* – zona 4, con l’indicazione del sistema di riferimento utilizzato per le misure del potenziale e della conduttanza.



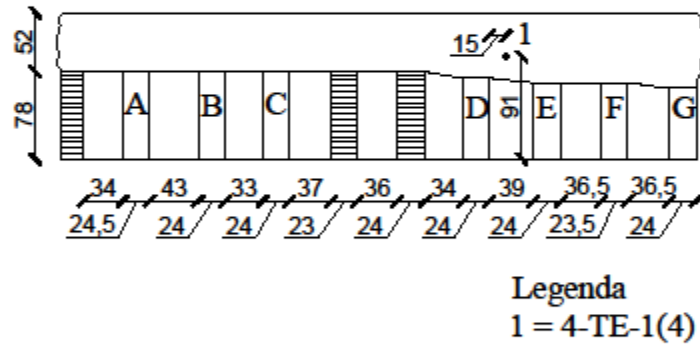


Figura A.31: Prospetto del corpo est sul lato ovest del *calidarium* delle *terme a mare* – zona 4, con l'indicazione del punto dove si è prelevato il campione (scala 1:50).

**APPENDICE B**

**PROVE SPERIMENTALI IN SITU**

**ZONA 1**

- SPESSORE DI COPRIFERRO

ELEMENTO	<b>PB</b>	Y (mm)							
Posizione		240	420	600	810	920	1140	1330	
X (mm)	130	<b>31</b>	<b>29</b>	<b>29</b>	<b>30</b>	<b>24</b>	<b>23</b>	<b>22</b>	
ELEMENTO	<b>PD</b>	Y (mm)							
Posizione		150	420	670	890	1100	1300		
X (mm)	130	<b>24</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>20</b>	<b>19</b>	<b>19</b>		

Tabella B.1: Posizione e valori di copriferro in mm dei pilastri PB e PD misurati sul lato sud-ovest.

ELEMENTO	<b>TA</b>	X (mm)										
Posizione		360	650	900	1120	1380	1620	1850	2100	2350	2650	
Y (mm)	310	<b>8</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>23</b>	<b>25</b>	<b>28</b>	<b>10</b>	<b>13</b>	<b>10</b>	<b>16</b>	
ELEMENTO	<b>TA</b>	X (mm)										
Posizione		2890	3120	3360	3600	3840	4000	4200				
Y (mm)	310	<b>11</b>	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>10</b>	<b>9</b>	<b>13</b>	<b>6</b>				
ELEMENTO	<b>TB</b>	X (mm)										
Posizione		450	730	930	1160	1400	1610	1820	2070	2250	2490	
Y (mm)	260	<b>18</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>16</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>15</b>	<b>17</b>	<b>16</b>	<b>15</b>	
ELEMENTO	<b>TB</b>	X (mm)										
Posizione		2710	2930	3140	3380	3610	3830	3980	4180			
Y (mm)	260	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>18</b>	<b>15</b>	<b>8</b>			
ELEMENTO	<b>TC</b>	X (mm)										
Posizione		430	630	880	1140	1420	1660	1900	2190	2450	2740	
Y (mm)	250	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>17</b>	
ELEMENTO	<b>TC</b>	X (mm)										
Posizione		3000	3220	3480	3680	3990	4230					
Y (mm)	250	<b>15</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>19</b>	<b>19</b>	<b>17</b>					
ELEMENTO	<b>TD</b>	X (mm)										
Posizione		500	720	920	1140	1380	1590	1820	2000	2170	2390	
Y (mm)	260	<b>15</b>	<b>13</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>12</b>	<b>14</b>	<b>12</b>	
ELEMENTO	<b>TD</b>	X (mm)										
Posizione		2640	2860	3000	3210							
Y (mm)	260	<b>15</b>	<b>15</b>	<b>19</b>	<b>20</b>							

Tabella B.2: Posizione e valori di copriferro in mm delle travi misurato sul lato sud-est.

ELEMENTO	<b>TA</b>	X (mm)										
Posizione		380	670	920	1170	1460	1690	1890	2160	2400	2660	
Y (mm)	310	<b>11</b>	<b>11</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>14</b>	<b>10</b>	<b>16</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	
ELEMENTO	<b>TA</b>	X (mm)										
Posizione		2920	3150	3390	3610	3840						
Y (mm)	310	<b>16</b>	<b>15</b>	<b>12</b>	<b>9</b>	<b>9</b>						
ELEMENTO	<b>TB</b>	X (mm)										
Posizione		520	750	970	1220	1440	1630	1860	2100	2260	2500	
Y (mm)	260	<b>16</b>	<b>20</b>	<b>18</b>	<b>16</b>	<b>15</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>20</b>	
ELEMENTO	<b>TB</b>	X (mm)										
Posizione		2720	2920	3160	3390	3650	3820	4000	4220	4380		
Y (mm)	260	<b>20</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>18</b>	<b>16</b>	<b>12</b>	<b>10</b>	<b>7</b>	<b>5</b>		
ELEMENTO	<b>TC</b>	X (mm)										
Posizione		370	580	920	1170	1440	1680	1950				
Y (mm)	250	<b>16</b>	<b>16</b>	<b>16</b>	<b>15</b>	<b>12</b>	<b>14</b>	<b>12</b>				
ELEMENTO	<b>TD</b>	X (mm)										
Posizione		250	500	710	920	1160	1400	1620	1810	2000	2260	
Y (mm)	260	<b>14</b>	<b>13</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	
ELEMENTO	<b>TD</b>	X (mm)										
Posizione		2430	2660	2890	3000	3240						
Y (mm)	260	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>18</b>	<b>12</b>	<b>11</b>						

Tabella B.3: Posizione e valori di copriferro in mm delle travi misurato sul lato nord-ovest.

- MISURE SCLEROMETRICHE

ELEMENTO	<b>PD</b>	Y (mm)										
posizione		1400										
X (mm)	130	<b>29</b>	<b>30</b>	<b>32</b>	<b>36</b>	<b>34</b>	<b>36</b>	<b>34</b>	<b>36</b>	<b>40</b>	<b>30</b>	

Tabella B.4: Posizione e valori sclerometrici del pilastro D misurati sulla faccia sud-ovest.

ELEMENTO	<b>TA</b>	X (mm)										
posizione		1000										
Y (mm)	310	<b>40</b>	<b>39</b>	<b>38</b>	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>38</b>	<b>46</b>	<b>42</b>	<b>42</b>	<b>43</b>	
ELEMENTO	<b>TB</b>	X (mm)										
posizione		1100										
Y (mm)	260	<b>46</b>	<b>43</b>	<b>40</b>	<b>42</b>	<b>39</b>	<b>42</b>	<b>46</b>	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>48</b>	
ELEMENTO	<b>TC</b>	X (mm)										
posizione		1500										
Y (mm)	250	<b>40</b>	<b>34</b>	<b>34</b>	<b>40</b>	<b>38</b>	<b>34</b>	<b>34</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>32</b>	

Tabella B.5: Posizione e valori sclerometrici della trave A misurati sulla faccia nord-ovest e delle travi B e C misurati sulla faccia sud-est.

- MISURE POTENZIALE

<b>ELEMENTO PA</b>	Y (mm)								
posizione		140	320	480	650	800	1000	1200	
X (mm)	125	<b>-265</b>	<b>-273</b>	<b>-371</b>	<b>-266</b>	<b>-250</b>	<b>-290</b>	<b>-310</b>	
<b>ELEMENTO PB</b>	Y (mm)								
Posizione		200	350	500	680	850	1030	1200	
X (mm)	130	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>50</b>	<b>30</b>	<b>10</b>	<b>-14</b>	<b>20</b>	
<b>ELEMENTO PC</b>	Y (mm)								
Posizione		390	540	700	850	1800			
X (mm)	125	<b>25</b>	<b>34</b>	<b>40</b>	<b>-72</b>	<b>122</b>			
<b>ELEMENTO PD</b>	Y (mm)								
Posizione		280	560	780	1000	1180	1400		
X (mm)	130	<b>-148</b>	<b>-98</b>	<b>-12</b>	<b>50</b>	<b>-10</b>	<b>-89</b>		

Tabella B.6: Posizione e valori di potenziale in mV/CSE dei pilastri sul lato sud-ovest.

<b>ELEMENTO TA</b>	X (mm)										
posizione		505	775	1010	1250	1500	1735	1975	2225	2500	2770
Y (mm)	310	<b>-203</b>	<b>-270</b>	<b>-319</b>	<b>-410</b>	<b>-421</b>	<b>-420</b>	<b>-380</b>	<b>-340</b>	<b>-330</b>	<b>-327</b>
<b>ELEMENTO TA</b>	X (mm)										
posizione		3005	3240	3480	3720	3920	4100	4300			
Y (mm)	310	<b>-330</b>	<b>-330</b>	<b>-305</b>	<b>-330</b>	<b>-350</b>	<b>-400</b>	<b>-430</b>			
<b>ELEMENTO TB</b>	X (mm)										
posizione		590	830	1045	1280	1505	1715	1945	2160	2370	2600
Y (mm)	260	<b>17</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>4</b>	<b>10</b>	<b>5</b>	<b>-3</b>	<b>-1</b>	<b>-5</b>	<b>-4</b>
<b>ELEMENTO TB</b>	X (mm)										
posizione		2820	3035	3260	3495	3720	3905	4080			
Y (mm)	260	<b>-6</b>	<b>-6</b>	<b>-11</b>	<b>-23</b>	<b>-53</b>	<b>-111</b>	<b>-137</b>			
<b>ELEMENTO TC</b>	X (mm)										
posizione		530	755	1010	1280	1540	1780	2045	2320	2595	2870
Y (mm)	250	<b>-180</b>	<b>-200</b>	<b>-220</b>	<b>-224</b>	<b>-227</b>	<b>-222</b>	<b>-230</b>	<b>-234</b>	<b>-233</b>	<b>-232</b>
<b>ELEMENTO TC</b>	X (mm)										
posizione		3110	3350	3580	3835	4110	4300				
Y (mm)	250	<b>-242</b>	<b>-273</b>	<b>-311</b>	<b>-290</b>	<b>-243</b>	<b>-284</b>				
<b>ELEMENTO TD</b>	X (mm)										
posizione		400	610	820	1030	1260	1485	1705	1910	2085	2280
Y (mm)	260	<b>-280</b>	<b>-281</b>	<b>-277</b>	<b>-268</b>	<b>-258</b>	<b>-262</b>	<b>-256</b>	<b>-256</b>	<b>-245</b>	<b>-240</b>
<b>ELEMENTO TD</b>	X (mm)										
posizione		2515	2750	2930	3105						
Y (mm)	260	<b>-299</b>	<b>-346</b>	<b>-353</b>	<b>-244</b>						

Tabella B.7: Posizione e valori di potenziale in mV/CSE delle travi misurato sul lato sud-est.

ELEMENTO	<b>TA</b>	X (mm)									
posizione		525	795	1045	1315	1575	1790	2025	2280	2530	2790
Y (mm)	310	<b>-295</b>	<b>-337</b>	<b>-351</b>	<b>-389</b>	<b>-402</b>	<b>-425</b>	<b>-393</b>	<b>-360</b>	<b>-360</b>	<b>-361</b>
ELEMENTO	<b>TA</b>	X (mm)									
posizione		3035	3270	3500	3725	3900					
Y (mm)	310	<b>-358</b>	<b>-380</b>	<b>-401</b>	<b>-416</b>	<b>-447</b>					
ELEMENTO	<b>TB</b>	X (mm)									
posizione		635	860	1095	1330	1535	1745	1980	2180	2380	2610
Y (mm)	260	<b>-45</b>	<b>-53</b>	<b>-69</b>	<b>-83</b>	<b>-92</b>	<b>-91</b>	<b>-96</b>	<b>-101</b>	<b>-95</b>	<b>-103</b>
ELEMENTO	<b>TB</b>	X (mm)									
posizione		2820	3040	3275	3520	3735	3910	4110			
Y (mm)	260	<b>-101</b>	<b>-124</b>	<b>-120</b>	<b>-150</b>	<b>-153</b>	<b>-98</b>	<b>-124</b>			
ELEMENTO	<b>TC</b>	X (mm)									
posizione		475	750	1045	1305	1560	1815				
Y (mm)	250	<b>-155</b>	<b>-185</b>	<b>-202</b>	<b>-214</b>	<b>-212</b>	<b>-197</b>				
ELEMENTO	<b>TD</b>	X (mm)									
posizione		375	605	815	1040	1280	1510	1715	1905	2130	2345
Y (mm)	260	<b>-220</b>	<b>-210</b>	<b>-220</b>	<b>-235</b>	<b>-242</b>	<b>-255</b>	<b>-268</b>	<b>-266</b>	<b>-272</b>	<b>-282</b>
ELEMENTO	<b>TD</b>	X (mm)									
posizione		2545	2775	2945	3120	3290					
Y (mm)	260	<b>-305</b>	<b>-317</b>	<b>-302</b>	<b>-290</b>	<b>-305</b>					

Tabella B.8: Posizione e valori di potenziale in mV/CSE delle travi misurato sul lato nord-ovest.

- MISURE CONDUTTANZA

ELEMENTO	<b>PB</b>	Y (mm)								
Posizione		200	350	500	680	850	1030	1200		
X (mm)	130		<b>5,7</b>	<b>16</b>	<b>8,4</b>	<b>6,7</b>	<b>18</b>	<b>19</b>		
ELEMENTO	<b>PD</b>	Y (mm)								
Posizione		280	560	780	1000	1180	1400			
X (mm)	130	<b>140</b>	<b>70</b>	<b>48</b>	<b>27</b>	<b>49</b>	<b>48</b>			

Tabella B.9: Posizione e valori della conduttanza in microS dei pilastri misurata tra faccia nord-ovest e faccia sud-est.

ELEMENTO	<b>TA</b>	X (mm)							
Posizione		505	775	1010	1250	1500	1735	1975	2225
Y (mm)	310	<b>160</b>	<b>108</b>	<b>74</b>	<b>91</b>			<b>108</b>	<b>114</b>
ELEMENTO	<b>TA</b>	X (mm)							
Posizione		2500	2770	3005	3240	3480	3720	3920	
Y (mm)	310	<b>86</b>	<b>82</b>	<b>91</b>	<b>117</b>	<b>195</b>	<b>194</b>	<b>180</b>	
ELEMENTO	<b>TB</b>	X (mm)							
Posizione		390	590	830	1045	1280	1505	1715	1945
Y (mm)	260	<b>74</b>	<b>87</b>	<b>50</b>	<b>56</b>	<b>43</b>	<b>50</b>	<b>42</b>	<b>37</b>
ELEMENTO	<b>TB</b>	X (mm)							
Posizione		2160	2370	2600	2820	3035	3260	3495	3720
Y (mm)	260	<b>46</b>	<b>25</b>	<b>32</b>	<b>35</b>	<b>30</b>	<b>43</b>	<b>46</b>	<b>113</b>
ELEMENTO	<b>TC</b>	X (mm)							
Posizione		400	530	755	1010	1280	1540	1780	
Y (mm)	250	<b>77</b>	<b>136</b>	<b>80</b>	<b>53</b>	<b>78</b>	<b>80</b>	<b>47</b>	
ELEMENTO	<b>TD</b>	X (mm)							
Posizione		400	610	820	1030	1260	1485	1705	1910
Y (mm)	260	<b>70</b>	<b>86</b>	<b>61</b>	<b>68</b>	<b>45</b>	<b>44</b>	<b>36</b>	<b>50</b>
ELEMENTO	<b>TD</b>	X (mm)							
Posizione		2085	2280	2515					
Y (mm)	260	<b>43</b>	<b>41</b>	<b>36</b>					

Tabella B.10: Posizione e valori della conduttanza in microS delle travi misurata tra faccia nord-ovest e faccia sud-est.

- CALCOLO RESISTIVITA'

ELEMENTO	<b>PB</b>	Y (mm)						
Posizione		200	350	500	680	850	1030	1200
X (mm)	130		<b>21862</b>	<b>7788</b>	<b>14835</b>	<b>18599</b>	<b>6923</b>	<b>6559</b>
ELEMENTO	<b>PD</b>	Y (mm)						
Posizione		280	560	780	1000	1180	1400	
X (mm)	130		<b>890</b>	<b>1780</b>	<b>2596</b>	<b>4615</b>	<b>2543</b>	<b>2596</b>

Tabella B.11: Posizione e valori della resistività elettrica in  $\Omega\text{m}$  dei pilastri misurata tra faccia nord-ovest e faccia sud-est.

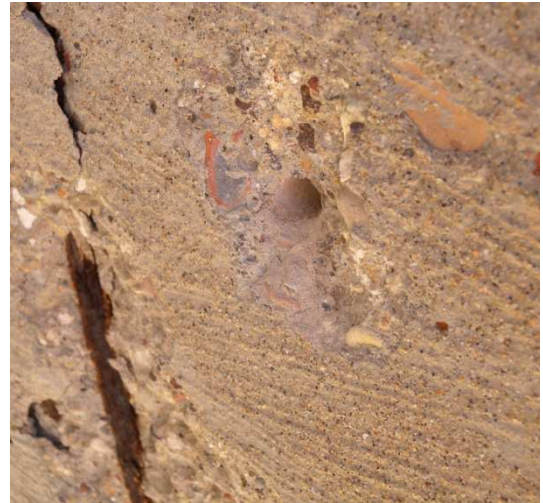
ELEMENTO	<b>TA</b>	X (mm)							
Posizione		505	775	1010	1250	1500	1735	1975	2225
Y (mm)	310	<b>988</b>	<b>1463</b>	<b>2136</b>	<b>1737</b>			<b>1463</b>	<b>1386</b>
ELEMENTO	<b>TA</b>	X (mm)							
Posizione		2500	2770	3005	3240	3480	3720	3920	
Y (mm)	310	<b>1838</b>	<b>1927</b>	<b>1737</b>	<b>1351</b>	<b>811</b>	<b>815</b>	<b>878</b>	
ELEMENTO	<b>TB</b>	X (mm)							
Posizione		390	590	830	1045	1280	1505	1715	1945
Y (mm)	260	<b>2085</b>	<b>1773</b>	<b>3086</b>	<b>2755</b>	<b>3588</b>	<b>3086</b>	<b>3673</b>	<b>4170</b>
ELEMENTO	<b>TB</b>	X (mm)							
Posizione		2160	2370	2600	2820	3035	3260	3495	3720
Y (mm)	260	<b>3354</b>	<b>6171</b>	<b>4821</b>	<b>4408</b>	<b>5143</b>	<b>3588</b>	<b>3354</b>	<b>1365</b>
ELEMENTO	<b>TC</b>	X (mm)							
Posizione		400	530	755	1010	1280	1540	1780	
Y (mm)	250	<b>2004</b>	<b>1134</b>	<b>1929</b>	<b>2911</b>	<b>1978</b>	<b>1929</b>	<b>3283</b>	
ELEMENTO	<b>TD</b>	X (mm)							
Posizione		400	610	820	1030	1260	1485	1705	1910
Y (mm)	260	<b>2314</b>	<b>1884</b>	<b>2656</b>	<b>2382</b>	<b>3600</b>	<b>3682</b>	<b>4500</b>	<b>3240</b>
ELEMENTO	<b>TD</b>	X (mm)							
Posizione		2085	2280	2515					
Y (mm)	260	<b>3767</b>	<b>3951</b>	<b>4500</b>					

Tabella B.12: Posizione e valori della resistività elettrica in  $\Omega\text{m}$  delle travi misurata tra faccia nord-ovest e faccia sud-est.

- PRELIEVO CAMPIONI



*a*



*b*

Figura B.1a: Indicazione del punto di prelievo del campione 1-TA-2(f) nella trave A, lato nord-ovest;  
*b*: Particolare del punto di prelievo del campione 1-TA-2(f) senza frammento, con vista del foro provocato dal trapano.





*a*



*b*



*c*

Figura B.2a: Indicazione del frammento 1-PB-3 raccolto da terra e riposizionato sullo spigolo del pilastro B, lato sud; *b*: Particolare della superficie di distacco del frammento raccolto da terra e posto in posizione speculare; *c*: Frammento 1-PB-3 con segno dell'armatura ossidata.



*a*



*b*

Figura B.3a: Frammento 1-PB-4, con indicazione dell'impronta dei ferri d'armatura; *b*: Particolare della superficie di distacco del frammento in sommità del pilastro B.



*a*



*b*



*c*

Figura B.4a: Indicazione del frammento 1-TC-1 raccolto da terra e riposizionato sulla trave C, lato sud-est; *b*: Frammento 1-TC-1 con segno delle armature ossidate; *c*: Particolare della superficie di distacco del frammento raccolto da terra e posto in posizione speculare.



*a*



*b*



*c*

Figura B.5a: Frammento 1-PD-2 con segno dell'armatura ossidata; *b*: Particolare prodotti di corrosione sulla superficie di rottura del frammento; *c*: Particolare della superficie di distacco del frammento sullo spigolo del pilastro D, lato est.



*a*



*b*

Figura B.6a: Indicazione del punto di prelievo del campione 1-TD-2 nella trave D, lato sud-est; *b*: Particolare del punto di prelievo del campione 1-TD-2 senza frammento.

- PROVA ALLA FENOLFTALEINA

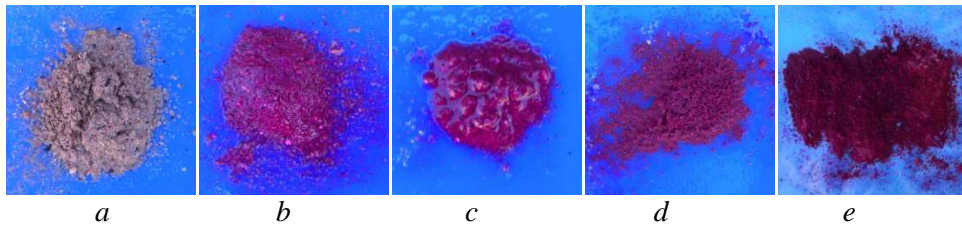


Figura B.7: Prova alla fenolftaleina sui 5 prelievi di polvere di calcestruzzo del campione 1-PB-2(a-e), disposti in profondità crescente.



*a*



*b*



*c*



*d*

Figura B.8a: Rottura del frammento 1-PB-3; *b*: Superfici di rottura del frammento 1-PB-3; *c*: Prova alla fenolftaleina sulle superfici di rottura del frammento 1-PB-3; *d*: Prova alla fenolftaleina sulla superficie di rottura del frammento 1-PB-4.

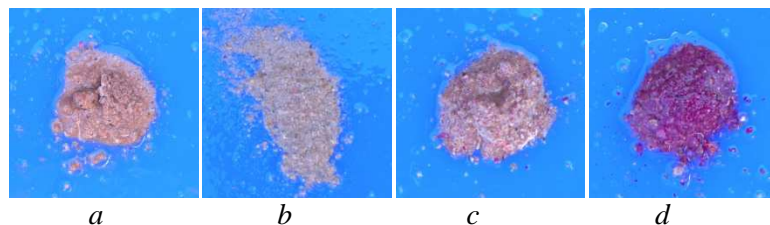


Figura B.9: Prova alla fenolftaleina sui 4 prelievi di polvere di calcestruzzo del campione 1-PD-1(a-d), disposti in profondità crescente.



Figura B.10: Prova alla fenolftaleina sulle superfici di rottura del frammento 1-PD-2.

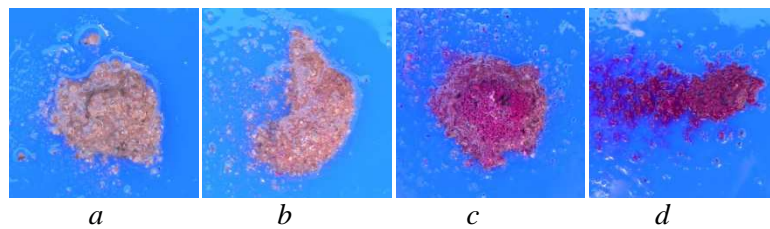


Figura B.11: Prova alla fenolftaleina sui 4 prelievi di polvere di calcestruzzo del campione 1-TA-3(a-d), disposti in profondità crescente.



Figura B.12: Prova alla fenolftaleina sulla superficie di rottura del frammento 1-TD-2.

**ZONA 2**

- OSSERVAZIONE VISIVA



Figura B.13: Vista nord-ovest dell'entrata posta a nord del *teatro*.



Figura B.14: Vista nord-est del muro, zona 2-*teatro*.



Figura B.15: Particolare corrosione dell'inserito metallico.

- MISURA CONDUTTANZA

ELEMENTO	MURO	Y (mm)		Y (mm)
posizione	<b>A-C</b>	850	<b>D-E</b>	395
X (mm)	325	<b>1160</b>	335	<b>2500</b>

*a*

ELEMENTO	MURO	Y' (mm)		Y' (mm)		Y' (mm)		Y' (mm)
posizione	<b>A-B</b>	1735	<b>C-D</b>	1530	<b>E-F</b>	1325	<b>G-H</b>	1090
X' (mm)	975	<b>1150</b>	975	<b>1500</b>	975	<b>1770</b>	975	<b>230</b>

*b*

ELEMENTO	VOLTA	Y' (mm)		Y' (mm)		Y' (mm)
posizione	<b>1-2</b>	1125	<b>3-4</b>	980	<b>5-6</b>	980
X' (mm)	975	<b>293</b>	1530	<b>350</b>	416	<b>120</b>

*c*

Tabella B.13: Posizione e valori della conduttanza in microS misurata sul lato nord, *a*: del muro; *b*: del muro sopra la volta; *c*: attraverso lo spessore della volta.

ELEMENTO	VOLTA	Y (mm)		Y (mm)		Y (mm)
posizione	<b>1-2</b>	940	<b>3-4</b>	720	<b>5-6</b>	340
X (mm)	660	<b>220</b>	410	<b>430</b>	200	<b>160</b>

ELEMENTO	VOLTA	Y (mm)		Y (mm)		Y (mm)
posizione	<b>7-8</b>	720	<b>9-10</b>	940	<b>11-12</b>	340
X (mm)	2140	<b>192</b>	1890	<b>164</b>	2350	<b>220</b>

*a*

ELEMENTO	VOLTA	Y (mm)		Y (mm)
posizione	<b>A-B</b>	750	<b>C-D</b>	700
X (mm)	440	<b>130</b>	2150	<b>130</b>

*b*

Tabella B.14: Posizione e valori della conduttanza in microS misurata sul lato sud, *a*: attraverso lo spessore della volta; *b*: sulla volta.

ELEMENTO	MURO	Y (mm)		Y (mm)		Y (mm)		Y (mm)
posizione	<b>L-M</b>	1645	<b>N-O</b>	1175	<b>P-Q</b>	705	<b>R-S</b>	235
X (mm)	840	<b>170</b>	840	<b>495</b>	840	<b>410</b>	840	<b>460</b>

Tabella B.15: Posizione e valori della conduttanza in microS, sul muro esposto ad ovest.

ELEMENTO	VOLTA	Y (mm)		Y (mm)		Y (mm)		Y (mm)
posizione	<b>E-F</b>	550	<b>G-H</b>	140	<b>F-L</b>	550	<b>H-M</b>	140
X (mm)	690	<b>88</b>	690	<b>60</b>	1290	<b>150</b>	1290	<b>230</b>

*a*

ELEMENTO	MURO	Y' (mm)		Y' (mm)		Y'' (mm)		Y'' (mm)
posizione	<b>A-B</b>	845	<b>C-D</b>	245				
X (mm)	570	<b>80</b>	570	<b>130</b>				
ELEMENTO	MURO	Y'' (mm)		Y'' (mm)		Y'' (mm)		Y'' (mm)
posizione	<b>N-O</b>	1090	<b>P-Q</b>	590	<b>R-S</b>	90	<b>K-J</b>	745
X' (mm)	600	<b>2360</b>	600	<b>2700</b>	600	<b>2710</b>	120	<b>50</b>

*b*

Tabella B.16: Posizione e valori della conduttanza in microS misurata sul lato est, *a*: della volta, *b*: del muro.

- CALCOLO RESISTIVITA'

ELEMENTO	MURO	Y (mm)		Y (mm)
posizione	<b>A-C</b>	850	<b>D-E</b>	395
X (mm)	325	<b>47</b>	335	<b>22</b>

*a*

ELEMENTO	MURO	Y' (mm)		Y' (mm)		Y' (mm)		Y' (mm)
posizione	<b>A-B</b>	1735	<b>C-D</b>	1530	<b>E-F</b>	1325	<b>G-H</b>	1090
X' (mm)	975	<b>47</b>	975	<b>36</b>	975	<b>31</b>	975	<b>235</b>

*b*

ELEMENTO	VOLTA	Y' (mm)		Y' (mm)		Y' (mm)
posizione	<b>1-2</b>	1125	<b>3-4</b>	980	<b>5-6</b>	980
X (mm)	975	<b>369</b>	1530	<b>309</b>	416	<b>900</b>

*c*

Tabella B.17: Posizione e valori della resistività elettrica in  $\Omega\text{m}$  misurata sul lato nord, *a*: del muro; *b*: del muro sopra la volta; *c*: attraverso lo spessore della volta.

ELEMENTO	VOLTA	Y (mm)		Y (mm)		Y (mm)
posizione	<b>1-2</b>	940	<b>3-4</b>	720	<b>5-6</b>	340
X (mm)	660	<b>491</b>	410	<b>251</b>	200	<b>675</b>
ELEMENTO	VOLTA	Y (mm)		Y (mm)		Y (mm)
posizione	<b>7-8</b>	720	<b>9-10</b>	940	<b>11-12</b>	340
X (mm)	2140	<b>563</b>	1890	<b>659</b>	2350	<b>491</b>

*a*

ELEMENTO	VOLTA	Y (mm)		Y (mm)
posizione	<b>A-B</b>	750	<b>C-D</b>	700
X (mm)	440	<b>415</b>	2150	<b>415</b>

*b*

Tabella B.18: Posizione e valori della resistività elettrica in  $\Omega\text{m}$  misurata sul lato sud, *a*: attraverso lo spessore della volta; *b*: sulla volta.



ELEMENTO	MURO	Y (mm)		Y (mm)		Y (mm)		Y (mm)
posizione	<b>L-M</b>	1645	<b>N-O</b>	1175	<b>P-Q</b>	705	<b>R-S</b>	235
X (mm)	840	<b>318</b>	840	<b>109</b>	840	<b>132</b>	840	<b>117</b>

Tabella B.19: Posizione e valori della resistività elettrica in  $\Omega\text{m}$ , sul muro esposto ad ovest.

ELEMENTO	VOLTA	Y (mm)		Y (mm)		Y (mm)		Y (mm)
posizione	<b>E-F</b>	550	<b>G-H</b>	140	<b>F-L</b>	550	<b>H-M</b>	140
X (mm)	690	<b>614</b>	690	<b>900</b>	1290	<b>360</b>	1290	<b>235</b>

*a*

ELEMENTO	MURO	Y' (mm)		Y' (mm)		Y'' (mm)		Y'' (mm)
posizione	<b>A-B</b>	845	<b>C-D</b>	245				
X' (mm)	570	<b>675</b>	570	<b>415</b>				
ELEMENTO	MURO	Y'' (mm)		Y'' (mm)		Y'' (mm)		Y'' (mm)
posizione	<b>N-O</b>	1090	<b>P-Q</b>	590	<b>R-S</b>	90	<b>K-J</b>	745
X' (mm)	600	<b>23</b>	600	<b>20</b>	600	<b>20</b>	120	<b>1080</b>

*b*

Tabella B.20: Posizione e valori della resistività elettrica in  $\Omega\text{m}$  misurata sul lato est, *a*: della volta, *b*: del muro.

- PRELIEVO CAMPIONI



Figura B.16: Indicazione del punto di prelievo del campione 2-VE-1(4) sulla volta, lato nord.



Figura B.17: Indicazione del punto di prelievo del campione 2-VE-2(4) sul muro, lato ovest.



Figura B.18: Indicazione del punto di prelievo del campione 2-VE-4(4) sul muro, lato nord.



Figura B.19: Indicazione del punto di prelievo del campione 2-VE-5(5) sul muro, lato nord.



Figura B.20: Indicazione del punto di prelievo del campione 2-VE-6(4) sul muro, lato ovest.

- PROVA ALLA FENOLFTALEINA

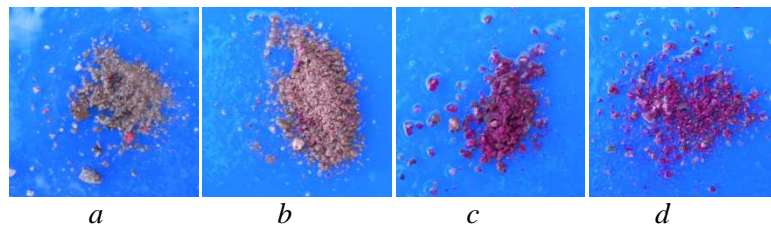


Figura B.21: Prova alla fenolftaleina sui 4 prelievi di polvere di calcestruzzo del campione 2-VE-1(a-d), disposti in profondità crescente.

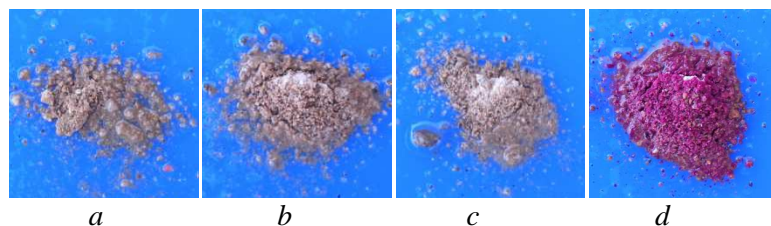


Figura B.22: Prova alla fenolftaleina sui 4 prelievi di polvere di calcestruzzo del campione 2-VE-2(a-d), disposti in profondità crescente.

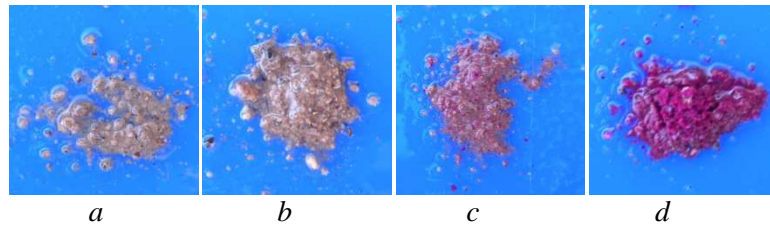


Figura B.23: Prova alla fenolftaleina sui 4 prelievi di polvere di calcestruzzo del campione 2-VE-4(a-d), disposti in profondità crescente.

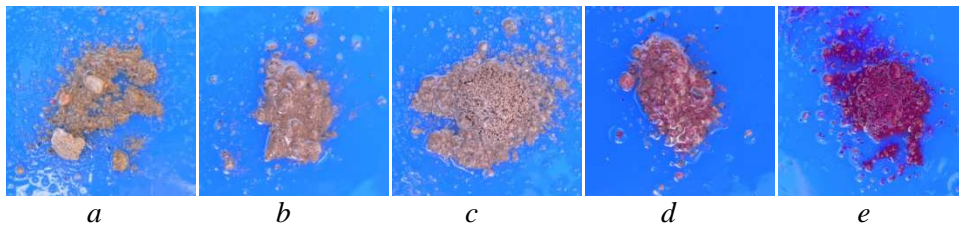


Figura B.24: Prova alla fenolftaleina sui 5 prelievi di polvere di calcestruzzo del campione 2-VE-5(a-e), disposti in profondità crescente.

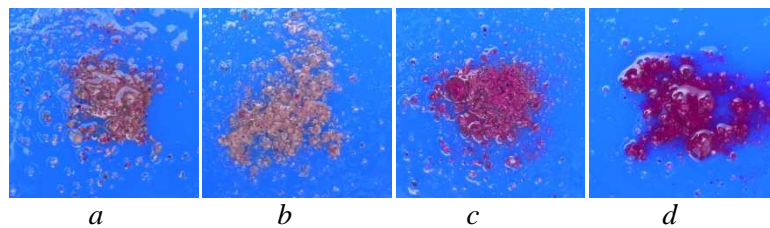


Figura B.25: Prova alla fenolftaleina sui 4 prelievi di polvere di calcestruzzo del campione 2-VE-6(a-d), disposti in profondità crescente.

**ZONA 3**

- OSSERVAZIONE VISIVA



Figura B.26: Particolare degli inserti metallici che fuoriescono dalla superficie del calcestruzzo.



Figura B.27: Particolare delle efflorescenze bianche presenti sulla superficie del calcestruzzo, *a*: nel lato sud dell'architrave.

- MISURE CONDUTTANZA

ELEMENTO	MURO	Y (mm)		Y (mm)		Y (mm)		Y (mm)		Y (mm)
posizione	<b>1-2</b>	400	<b>3-4</b>	800	<b>5-6</b>	1200	<b>7-8</b>	1600	<b>9-10</b>	1900
X (mm)	550	<b>235</b>	550	<b>145</b>	550	<b>122</b>	550	<b>113</b>	550	<b>111</b>

*a*

ELEMENTO	MURO	Y (mm)		Y (mm)		Y (mm)		Y (mm)
posizione	<b>1-2</b>	800	<b>3-4</b>	1200	<b>5-6</b>	1600	<b>7-8</b>	1900
X (mm)	475	<b>70</b>	475	<b>140</b>	475	<b>85</b>	475	<b>70</b>

*b*

ELEMENTO	MURO	Y (mm)		Y (mm)		Y (mm)
posizione	<b>1-2</b>	1200	<b>3-4</b>	1600	<b>5-6</b>	2000
X (mm)	400	<b>91</b>	400	<b>107</b>	400	<b>79</b>

*c*

Tabella B.21: Posizione e valori della conduttanza in microS misurata sul muro, *a*: lato nord; *b*: lato sud; *c*: lato ovest.

- PRELIEVO CAMPIONI



Figura B.28: Indicazione del punto di prelievo del campione 3-V-1(4) sul muro, lato sud.



Figura B.29: Indicazione del punto di prelievo del campione 3-V-2(4) sul muro, lato nord.



Figura B.30: Indicazione del punto di prelievo del campione 3-V-3(4) sul muro, lato ovest.

- MISURA DELLA PROFONDITA' DI CARBONATAZIONE

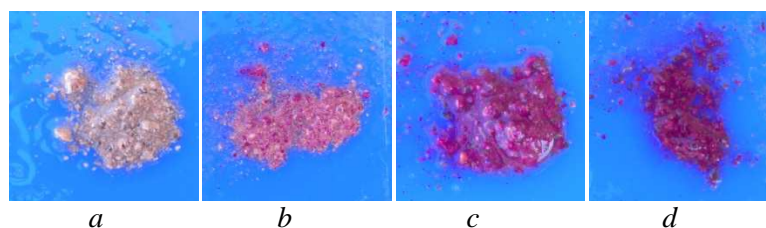


Figura B.31: Prova alla fenolftaleina sui 4 prelievi di polvere di calcestruzzo del campione 3-V-1(a-d) esposto a sud, disposti in profondità crescente.

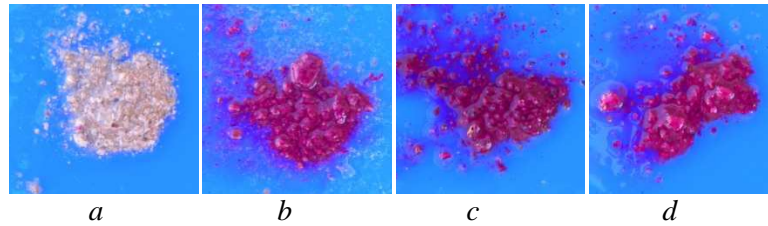


Figura B.32: Prova alla fenolftaleina sui 4 prelievi di polvere di calcestruzzo del campione 3-V-2(*a-d*) esposto a nord, disposti in profondità crescente.

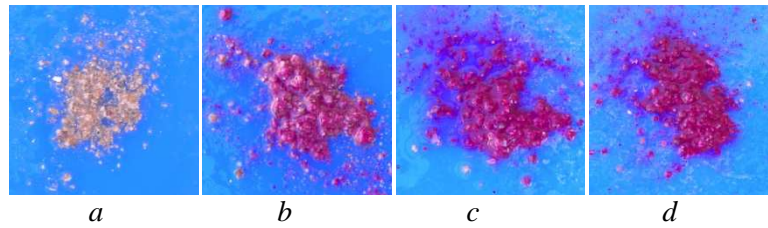


Figura B.33: Prova alla fenolftaleina sui 4 prelievi di polvere di calcestruzzo del campione 3-V-3(*a-d*) esposto ad ovest, disposti in profondità crescente.

**ZONA 4**

- OSSERVAZIONE VISIVA

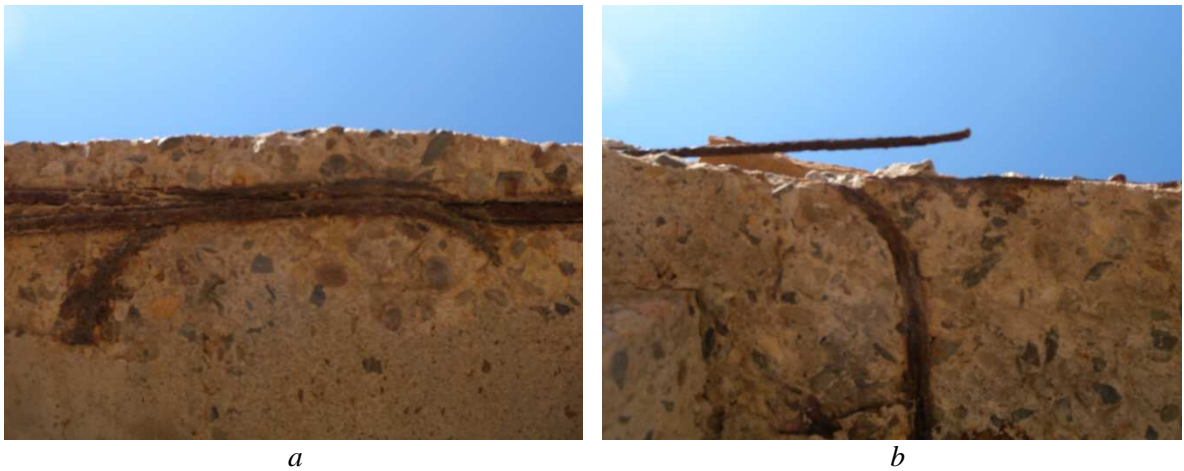


Figura B.34a-b: Particolare della corrosione delle armature del corpo nord.

- MISURE POTENZIALE

ELEMENTO	A	Y (mm)	B	Y (mm)	C	Y (mm)
posizione		740		840		880
X (mm)	115	<b>-134</b>	115	<b>-21</b>	120	<b>-150</b>

*a*

ELEMENTO	C	Y (mm)	D	Y (mm)	E	Y (mm)	F	Y (mm)
posizione		940		950		960		970
X (mm)	120	<b>-286</b>	120	<b>-212</b>	120	<b>-160</b>	115	<b>-185</b>

*b*

ELEMENTO	F	Y (mm)	G	Y (mm)	H	Y (mm)
posizione		900		840		740
X (mm)	120	<b>-246</b>	120	<b>-139</b>	120	<b>-294</b>

*c*

Tabella B.22: Posizione e valori di potenziale in mV/CSE dei pilastri del corpo nord misurato *a*: sul lato ovest, *b*: sul lato sud e *c* sul lato est.

ELEMENTO	A	Y (mm)	B	Y (mm)	C	Y (mm)
posizione		780		780		780
X (mm)	123	<b>-212</b>	120	<b>-190</b>	120	<b>-205</b>
ELEMENTO	D	Y (mm)	E	Y (mm)	F	Y (mm)
posizione		720		680		680
X (mm)	120	<b>-283</b>	120	<b>-210</b>	118	<b>-180</b>

Tabella B.23: Posizione e valori di potenziale in mV/CSE dei pilastri del corpo est misurati sul lato ovest.

- MISURE CONDUTTANZA

ELEMENTO	A	Y (mm)	B	Y (mm)	C	Y (mm)
posizione		370		420		440
X (mm)	115	<b>1820</b>	115	<b>570</b>	120	<b>165</b>

*a*

ELEMENTO	C	Y (mm)	D	Y (mm)	E	Y (mm)	F	Y (mm)
posizione		470		475		480		485
X (mm)	120	<b>115</b>	120	<b>685</b>	120	<b>180</b>	115	<b>90</b>

*b*

ELEMENTO	F	Y (mm)	G	Y (mm)	H	Y (mm)
posizione		450		420		370
X (mm)	120	<b>45</b>	120	<b>190</b>	120	<b>3100</b>

*c*

Tabella B.24: Posizione e valori della conduttanza in microS misurata attraverso lo spessore dei pilastri del corpo nord, *a* e *c*: tra faccia nord e faccia sud; *b*: tra faccia ovest e faccia est.

ELEMENTO	A	Y (mm)	B	Y (mm)	C	Y (mm)	D	Y (mm)
posizione		390		390		390		360
X (mm)	123	<b>1340</b>	120	<b>670</b>	120	<b>920</b>	120	<b>2290</b>
ELEMENTO	E	Y (mm)	F	Y (mm)	G	Y (mm)		
posizione		340		340		315		
X (mm)	120	<b>2180</b>	118	<b>1900</b>	120	<b>1910</b>		

*a*

ELEMENTO		Y (mm)		Y (mm)
posizione	<b>W-Z</b>	880	<b>K-Y</b>	820
X (mm)	240	<b>340</b>	120	<b>490</b>

*b*

Tabella B.25: Posizione e valori della conduttanza in microS misurata *a*: attraverso lo spessore dei pilastri del corpo est, tra faccia nord e faccia sud; *b*: sullo spessore della soletta rivolta ad ovest.



- CALCOLO RESISTIVITA'

ELEMENTO	A	Y (mm)	B	Y (mm)	C	Y (mm)
posizione		370		420		440
X (mm)	115	<b>76</b>	115	<b>244</b>	120	<b>843</b>

*a*

ELEMENTO	C	Y (mm)	D	Y (mm)	E	Y (mm)	F	Y (mm)
posizione		470		475		480		485
X (mm)	120	<b>1189</b>	120	<b>200</b>	120	<b>759</b>	115	<b>1519</b>

*b*

ELEMENTO	F	Y (mm)	G	Y (mm)	H	Y (mm)
posizione		450		420		370
X (mm)	120	<b>3000</b>	120	<b>711</b>	120	<b>44</b>

*c*

Tabella B.26: Posizione e valori della resistività elettrica in  $\Omega\text{m}$  misurata attraverso lo spessore dei pilastri del corpo nord, *a* e *c*: tra faccia nord e faccia sud; *b*: tra faccia ovest e faccia est.

ELEMENTO	A	Y (mm)	B	Y (mm)	C	Y (mm)	D	Y (mm)
posizione		390		390		390		360
X (mm)	123	<b>101</b>	120	<b>201</b>	120	<b>147</b>	120	<b>59</b>
ELEMENTO	E	Y (mm)	F	Y (mm)	G	Y (mm)		
posizione		340		340		315		
X (mm)	120	<b>62</b>	118	<b>71</b>	120	<b>71</b>		

*a*

ELEMENTO		Y (mm)		Y (mm)
posizione	<b>W-Z</b>	880	<b>K-Y</b>	820
X (mm)	240	<b>159</b>	120	<b>110</b>

*b*

Tabella B.27: Posizione e valori della resistività elettrica in  $\Omega\text{m}$  misurata *a*: attraverso lo spessore dei pilastri del corpo est, tra faccia nord e faccia sud; *b*: sullo spessore della soletta rivolta ad ovest.

- PRELIEVO CAMPIONI



Figura B.35: Indicazione del punto di prelievo del campione 4-TE-1(4) sullo spessore della soletta del corpo est, lato ovest.

**APPENDICE C**  
**INVENTARIO CAMPIONI**

<b>Nome campione</b>	<b>Tipo</b>	<b>Peso netto (g)</b>	<b>Analisi Cl<sup>-</sup> (%cls)</b>	<b>Verifica analisi Cl<sup>-</sup> (%cls)</b>	<b>Analisi Cl<sup>-</sup> (%cem)</b>
1-PA-3-a	polvere	5,54	X		
1-PA-4	frammento	63,61			
1-PA-Fe-1	ossido Fe	2,93			
1-PB-1-a	polvere	5,38			
1-PB-2-a	polvere	4,73	X		
1-PB-2-b	polvere	4,23	X		
1-PB-2-c	polvere	3,66	X		
1-PB-2-d	polvere	3,83	X		
1-PB-2-e	polvere	3,33	X		
1-PB-3	frammento	377,76			
1-PB-4	frammento	342,93			
1-PC-Fe-1	staffa	-			
1-PC-Fe-2	ossido Fe	9,75			
1-PD-1-a	polvere	3,34	X	X	X
1-PD-1-b	polvere	4,7	X	X	X
1-PD-1-c	polvere	3,82	X	X	X
1-PD-1-d	polvere	3,31	X	X	X
1-PD-2	frammento	356,55			
1-TA-1-a	polvere	4,38	X		
1-TA-1-b	polvere	4,23	X		
1-TA-1-c	polvere	4,56	X		
1-TA-1-d	polvere	2,97	X		
1-TA-1-e	polvere	3,92	X		
1-TA-1-f	polvere	3,24	X		
1-TA-1-g	polvere	3,89	X		
1-TA-1-h	polvere	1,93			
1-TA-1-i	polvere	4,23	X		
1-TA-1-L	polvere	3,5	X		
1-TA-2	frammento	21,33			
1-TA-3-a	polvere	4,25	X	X	X
1-TA-3-b	polvere	5,33	X	X	X
1-TA-3-c	polvere	3,8	X	X	X
1-TA-3-d	polvere	3,79	X	X	X
1-TC-1	frammento	376,94			
1-TD-1-a	polvere	4,27	X		
1-TD-1-b	polvere	3,95	X		
1-TD-1-c	polvere	5,21	X		
1-TD-1-d	polvere	3,66	X		
1-TD-1-e	polvere	4,37	X		
1-TD-1-f	polvere	2,85	X		
1-TD-1-g	polvere	5,65	X		
1-TD-1-h	polvere	3,71	X		
1-TD-1-i	polvere	3,44	X		
1-TD-1-L	polvere	0,32			
1-TD-2	frammento	7,79			

Tabella C.1: Caratteristiche dei provini della zona 1 (*terme centrali*) e indicazione dei provini sui quali è stata effettuata l'analisi dei cloruri.

<b>Nome campione</b>	<b>Tipo</b>	<b>Peso netto (g)</b>	<b>Analisi Cl<sup>-</sup> (%cls)</b>	<b>Verifica analisi Cl<sup>-</sup> (%cls)</b>	<b>Analisi Cl<sup>-</sup> (%cem)</b>
2-VE-1-a	polvere	2,51			
2-VE-1-b	polvere	5,17	X	X	
2-VE-1-c	polvere	0,96			
2-VE-1-d	polvere	2,09			
2-VE-2-a	polvere	6,68	X	X	
2-VE-2-b	polvere	4,35	X	X	
2-VE-2-c	polvere	5,69	X	X	
2-VE-2-d	polvere	3,33	X	X	
2-VE-3	frammento	17,28			
2-VE-4-a	polvere	7,19	X	X	X
2-VE-4-b	polvere	3,34	X	X	X
2-VE-4-c	polvere	4,39	X	X	X
2-VE-4-d	polvere	3,25	X	X	X
2-VE-5-a	polvere	6,75	X	X	X
2-VE-5-b	polvere	4,56	X	X	X
2-VE-5-c	polvere	3,72	X	X	X
2-VE-5-d	polvere	3,41	X	X	X
2-VE-5-e	polvere	4,38	X	X	X
2-VE-6-a	polvere	1,67			
2-VE-6-b	polvere	2,95			
2-VE-6-c	polvere	2,76			
2-VE-6-d	polvere	4,37	X	X	
2-VE-7	frammento	40,74			
2-VE-Fe-1	ossido Fe	3,07			
2-VE-Fe-2	ossido Fe	5,4			

Tabella C.2: Caratteristiche dei provini della zona 2 (*teatro*) e indicazione dei provini sui quali è stata effettuata l'analisi dei cloruri.

<b>Nome campione</b>	<b>Tipo</b>	<b>Peso netto (g)</b>	<b>Analisi Cl<sup>-</sup> (%cls)</b>	<b>Verifica analisi Cl<sup>-</sup> (%cls)</b>	<b>Analisi Cl<sup>-</sup> (%cem)</b>
3-V-1-a	polvere	3,79	X		
3-V-1-b	polvere	3,94	X		
3-V-1-c	polvere	3,45	X		
3-V-1-d	polvere	2,87			
3-V-2-a	polvere	3,81	X		
3-V-2-b	polvere	3,99	X		
3-V-2-c	polvere	3,28	X		
3-V-2-d	polvere	3,29	X		
3-V-3-a	polvere	4,21	X		
3-V-3-b	polvere	5,21	X		
3-V-3-c	polvere	3,74	X		
3-V-3-d	polvere	4,96	X		
3-V-4	frammento	69,59			

Tabella C.3: Caratteristiche dei provini della zona 3 (*terme a mare-frigidarium*) e indicazione dei provini sui quali è stata effettuata l'analisi dei cloruri.

<b>Nome campione</b>	<b>Tipo</b>	<b>Peso netto (g)</b>	<b>Analisi Cl<sup>-</sup> (%cls)</b>	<b>Verifica analisi Cl<sup>-</sup> (%cls)</b>	<b>Analisi Cl<sup>-</sup> (%cem)</b>
4-TE-1-a	polvere	4,36	X		
4-TE-1-b	polvere	4,09	X		
4-TE-1-c	polvere	3,87	X		
4-TE-1-d	polvere	2,44			

Tabella C.4: Caratteristiche dei provini della zona 4 (*terme a mare-calidarium*) e indicazione dei provini sui quali è stata effettuata l'analisi dei cloruri.