POLITECNICO DI TORINO

Laurea Magistrale

In Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

Diagnosi dello stato corrosivo di travi da ponte alla fine della vita utile

Relatore

Prof. Francesco Tondolo

Correlatore

Ing. Pierclaudio Savino

Candidato

Emanuele Arena

Anno Accademico 2020/2021

Indice

INTRODUZIONE 8
1 Descrizione dei fenomeni di degrado nel calcestruzzo armato 10
1.1 Degrado nel calcestruzzo 10
1.1.1 Dilavamento del calcestruzzo 11
1.1.2 Carbonatazione del calcestruzzo 11
1.1.3 Aggressione da solfati 12
1.1.4 Aggressione da cloruri 13
1.1.5 Fenomeni di gelo-disgelo 14
1.1.6 Effetto delle temperature elevate 14
1.1.7 Effetto della fessurazione 15
1.2 La corrosione delle armature 15
1.2.1 La corrosione dal punto di vista elettrochimico 16
1.2.2 Caratteristiche anodiche, catodiche e condizione di corrosione 18
1.2.3 Perdita di passività e propagazione della corrosione 21
1.2.4 Effetti della carbonatazione nelle barre di armatura 22
1.2.5 Corrosione da cloruri 24
2 Le tecniche di diagnostica strutturale 26
2.1 Diagnosi attacco solfatico 26
2.2 Diagnosi sulla corrosione dovuta ai cloruri 27
2.3 Diagnosi degrado da gelo-disgelo 28
2.4 Diagnosi degrado da dilavamento e carbonatazione 28
2.5 Prove non distruttive 29
2.5.1 Indagini pacometriche 29
2.5.2 Indagini radar 30
2.5.3 Potenziale di corrosione 31
2.5.4 Resistività del calcestruzzo 32
2.5.5 Velocità di corrosione 33
2.5.6 Misura sclerometrica 33
2.5.7 Misura con ultrasuoni 34
2.5.8 Test termografici 35
2.6 Prove sperimentali per la valutazione dello stato corrosivo di travi alla fine della vita utile 36
3 Descrizione della struttura in esame 37

3.1 Descrizione della strumentazione utilizzata 42
3.2 Descrizione prova 46
4 Risultati 52
5 CONCLUSIONI 109
Bibliografia 110
RINGRAZIAMENTI 4

RINGRAZIAMENTI

Non posso che concludere questo percorso ringraziando tutte quelle persone che ne hanno fatto parte.

Per iniziare ringrazio il mio relatore il Prof. Francesco Tondolo per l'opportunità che mi ha dato nel partecipare a questo importante progetto e ringrazio anche l'ing. Pierclaudio Savino per il supporto e la guida che mi hanno fornito durante lo svolgimento della tesi.

Un grazie alla mia famiglia per essermi stata vicino ed in particolare ai miei genitori, che mi hanno guidato e sostenuto in tutto e per tutto ed è grazie a loro che oggi posso realizzare questo sogno, grazie infinite.

Grazie alla mia fidanzata Aurora, con la quale ho condiviso ogni singolo momento di questo percorso. Grazie per esserci stata anche in quei momenti difficili che mi hanno fatto barcollare, mi hai dato la forza per rialzarmi e continuare.

Grazie a tutti coloro che mi sono stati vicini e ai miei colleghi nonché amici e compagni di questo traguardo con la quale ho condiviso questo percorso.

Indice Figure

Figura 1 - Smeaton's Tower [Fonte: Di Nilfanion - Opera propria, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7955422] 8
Figura 2 – Degrado di un ponte in calcestruzzo armato [Fonte: https://www.ingenio-web.it/21621-garantire-la-durabilita-di-unopera-in-calcestruzzo-partendo-dalla-conoscenza-dei-fenomeni-di-degrado] 10
Figura 3 – Effetto del dilavamento nel calcestruzzo [Fonte: Felitti, Matteo, and Lucia Rosaria Mecca. Il Degrado Delle Strutture in Calcestruzzo Armato Diagnosi, Monitoraggio E Soluzioni per Il Recupero. Santarcangelo Di Romagna: Maggioli, 2018] 11
Figura 4 – Effetto della carbonatazione nel calcestruzzo armato [Fonte: https://www.gruppomigliaccio.com/wp-content/uploads/2019/11/DSC04251-600x450.jpg] 12
Figura 5 - Degrado di un canale per attacco solfatico delle acque e formazione di ettringite secondaria [Fonte: https://www.encosrl.it/wp-content/uploads/2017/08/Figura-2.jpg] 13
Figura 6 - Degrado da cloruri nel calcestruzzo armato [Fonte: Felitti, Matteo, and Lucia Rosaria Mecca. Il Degrado Delle Strutture in Calcestruzzo Armato Diagnosi, Monitoraggio E Soluzioni per Il Recupero. Santarcangelo Di Romagna: Maggioli, 2018.] 13
Figura 7 – Corrosione da cloruri localizzata (pitting) [Fonte: Pedeferri, Pietro. Corrosion Science and Engineering. Cham: Springer International, 2018.] 14
Figura 8 - Fenomeni della corrosione nelle opere civili [Fonte: https://www.positanonews.it/2018/09/carbonatazione-male-occulto-del-cemento-armato/3264830/] 16
Figura 9 – Processo elettrochimico con formazione della rugine [Fonte: Bagatti, Corradi, Desco, Ropa, Chimica, Zanichelli Editore, 2012] 17
Figura 10 – Diagramma di Pourbaix: a) situazione di corrosione b) fasi stabili [Fonte: Alunno Rossetti, Vito. Il Calcestruzzo Materiali E Tecnologia. 3.rd ed. Milano: McGraw-Hill, 2007.] 18
Figura 11 – Andamento schematico della caratteristica anodica dell'acciaio in calcestruzzi non carbonatati e non contenenti cloruri. [Fonte: Bossio, Antonio. Corrosione E Diagnostica Delle Strutture in Calcestruzzo Armato Criteri Di Intervento E Di Ripristino Conservativo. Assago: Wolters Kluwer, 2014.] 19
Figura 12 – Andamento schematico della caratteristica catodica dell'acciaio in soluzione alcalina. [Fonte: Bossio, Antonio. Corrosione E Diagnostica Delle Strutture in Calcestruzzo Armato Criteri Di Intervento E Di Ripristino Conservativo. Assago: Wolters Kluwer, 2014.] 20
Figura 13 – Schematizzazione delle condizioni di corrosione delle armature [Fonte: Bossio, Antonio. Corrosione E Diagnostica Delle Strutture in Calcestruzzo Armato Criteri Di Intervento E Di Ripristino Conservativo. Assago: Wolters Kluwer, 2014.] 21
Figura 14 – Modello di Tuutti che rappresenta i periodi di innesco e di propagazione della corrosione in una struttura in calcestruzzo armato. [Fonte: Tuutti K., "Corrosion of steel in concrete", Swedish cement and concrete institute (CIB), No: 4-82, Stockholm, 1982.] 22
Figura 15 – Andamento penetrazione carbonatazione nel calcestruzzo; curva a_1 calcestruzzo con una permeabilità maggiore. [Fonte: Alunno Rossetti, Vito. Il Calcestruzzo Materiali E Tecnologia. 3.rd ed. Milano: McGraw-Hill, 2007] 23
Figura 16 –Corrosione da cloruri localizzata (pitting) [Fonte: Pedeferri, Pietro. Corrosion Science and Engineering. Cham: Springer International, 2018] 24

Figura 17 – Schema di un attacco di tipo pitting [Fonte: Bossio, Antonio. Corrosione E Diagnostica Delle Strutture in Calcestruzzo Armato Criteri Di Intervento E Di Ripristino Conservativo. Assago: Wolters Kluwer, 2014.] 25
Figura 18 - Diffrattogramma ai raggi X effettuato su provini di calcestruzzo degradati da attacco solfatico [Fonte: L. Coppola, "La Diagnosi del Degrado delle Strutture in Calcestruzzo", L'Industria Italiana del Cemento, 681, pp. 657-666, Roma (1993).] 27
Figura 19 – Prova colorimetrica alla fluoresceina [Fonte: Collepardi, Mario, J. Jacob Ogoumah Olagot, Francesca Simonelli, and Roberto Troli. Il Calcestruzzo Vulnerabile Prevenzione, Diagnosi Del Degrado E Restauro. Villorba: Tintoretto, 2005.] 28
Figura 20 – Carota in calcestruzzo colorata dalla fenolftaleina per effetto della carbonatazione [Fonte: https://www.structuralsurveys.it/indagini-su-strutture-in-calcestruzzo-carbonatazione-del-calcestruzzo/] 29
Figura 21 – Pacometro [Fonte: Foto scattata in cantiere durante lo svolgimento della tesi sperimentale] 29
Figura 22 – Indagine pacometrica [Fonte: Foto scattata in cantiere durante lo svolgimento della tesi sperimentale] 30
Figura 23 – Radargramma di una trave in c.a.p. [Fonte: Felitti, Matteo, and Lucia Rosaria Mecca. Il Degrado Delle Strutture in Calcestruzzo Armato Diagnosi, Monitoraggio E Soluzioni per Il Recupero. Santarcangelo Di Romagna: Maggioli, 2018.] 31
Figura 24 – Variazione del potenziale delle armature in acciaio in funzione alla condizione di corrosione [Fonte: Pucinotti, Raffaele. Patologia E Diagnostica Del Cemento Armato. Palermo: Flaccovio, 2006.] 32
Figura 25 – Sclerometro [Fonte: https://www.pce-instruments.com/italiano/strumento-di-misura/misuratore/sclerometro-pce-instruments-sclerometro-pce-ht-225a-det_5837139.htm] .. 33
Figura 26 – Curva di correlazione clerometrica [Fonte: http://www.elmeg.org] 34
Figura 27 – strumenti per la prova ultrasonica [Fonte: Felitti, Matteo, and Lucia Rosaria Mecca. Il Degrado Delle Strutture in Calcestruzzo Armato Diagnosi, Monitoraggio E Soluzioni per Il Recupero. Santarcangelo Di Romagna: Maggioli, 2018.] 35
Figura 28 – Esempio di test termografico su una struttura [Fonte: https://www.casicura.com/servizi/termografia/] 36
Figura 29 – Viadotto di Corso Grosseto. La parte evidenziata rappresenta l'impalcato oggetto di analisi. 37
Figura 30 – Sezione trasversale impalcato 38
Figura 31 – Sezione di mezzeria della trave intermedia prefabbricata a doppio T 38
Figura 32 - Sezione di mezzeria della trave di bordo prefabbricata a U 39
Figura 33 – Demolizione mediante l'utilizzo di pinze idrauliche 39
Figura 34 – Processo di dismissione viadotto 40
Figura 35 – Panoramica posizione travi in cantiere 40
Figura 36 – Posizione delle travi originaria con il relativo codice di identificazione 41
Figura 37 – Posizione delle travi in situ con il relativo codice di identificazione 41
Figura 38 – Dispositivo di misura Giatec iCOR® [Fonte: Giatec-iCOR-UserManual] 42
Figura 39 - Rilevamento della corrosione delle armature all'interno del calcestruzzo. [Fonte: Giatec-iCOR-UserManual] 42

Figura 40 – Esempio di risposta di una barra che si corrode e di una barra che non si corrode. [Fonte: Giatec-iCOR-UserManual] 43
Figura 41 – Circuito elettrico utilizzato dal dispositivo [Fonte: Giatec-iCOR-UserManual] 44
Figura 42 - Relazione tra i valori del potenziale e la probabilità di corrosione (adattato da ASTM C876) [Fonte: Giatec-iCOR-UserManual] 45
Figura 43 - Intervalli tipici del potenziale a semicella dell'armatura nel calcestruzzo (adattato da RILEM TC-154, 2003) [Fonte: Giatec-iCOR-UserManual] 45
Figura 44- classificazione in base ai valori di resistività 46
Figura 45 -classificazione in base ai valori di velocità di corrosione 46
Figura 46 – Voltmetro 47
Figura 47 – Icona applicazione iCOR [Fonte: Giatec-iCOR-UserManual] 47
Figura 48 – a sinistra il kit per verifica della misura del potenziale di corrosione a semicella; a destra il kit per la verifica di velocità di corrosione e resistività elettrica. [Fonte: Giatec-iCOR-UserManual] 47
Figura 49 – Tipologie di misura dello strumento [Fonte: Giatec-iCOR-UserManual] 48
Figura 50 – Esempio griglia 49
Figura 51 – Preparazione degli elettrodi [Fonte: Giatec-iCOR-UserManual] 49
Figura 52 –Esempio posizionamento dello strumento [Fonte: Foto scattata in cantiere durante lo svolgimento della tesi sperimentale] 50
Figura 53 – Esempio grafico test di misura 51
Figura 54 –Sistema di riferimento 52
Figura 55 - pianta impalcato 101
Figura 56 – EST INIZIO TRAVE T1-P47/46 102
Figura 57 - Figura 58 – SEZIONE SUD TRAVE T1-P47/46 ..... **Errore. Il segnalibro non è definito.**
Figura 59 - Trave C1-P46/47 103
Figura 60- Intradosso parte centrale Trave T10-P47/46 104
Figura 61 - INTRADOSSO LATO SUD TRAVE T5-P47/46 106
Figura 62 – SUPERFICIE LATERALE OVEST INIZIO TRAVE T5-P47/46 106
Figura 63 – INTRADOSSO LATO SUD TRAVE T6-P47/46 107
Figura 64 - SUPERFICIE LATERALE EST INIZIO TRAVE T6-P47/46 108
Figura 65 - SUPERFICIE LATERALE OVEST FINE TRAVE T6-P47/46 108

INTRODUZIONE

I primi cenni di utilizzo di legante idraulico nel corso della storia si riscontra ai tempi dei romani, che inizialmente utilizzavano la calce come legante, ma la fase di indurimento richiedeva tempi elevati. Successivamente, dopo aver sostituito la sabbia che costituisce la malta con la pozzolanica, notarono che la malta induriva anche in acqua ed in assenza di aria e questo permise di ridurre i tempi di indurimento e di migliorarne la resistenza.

Un passaggio essenziale è stata la scoperta di Jhon Smeaton della calce idraulica, che fu realizzata con la cottura del calcare contenente delle impurità. Egli realizzò la torre di Smeaton, un antico faro costruito nel 1759 che nel 1870 fu smontato e portato a Plymounth. Successivamente a questa scoperta iniziarono una serie di fasi sperimentali che permisero di arrivare ai tempi moderni ed all'utilizzo del cemento Portland e altre tipologie.

Figura 1 - Smeaton's Tower [Fonte: Di Nilfanion - Opera propria, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7955422]

Con il passare del tempo e dopo diverse sperimentazioni si notò che le barre di armatura annegate nel calcestruzzo miglioravano il comportamento della struttura e quindi la combinazione di acciaio e calcestruzzo ha segnato una svolta nell'ambito delle costruzioni.

Il calcestruzzo e l'acciaio hanno un coefficiente di dilatazione circa uguale e questo permette di ottenere una combinazione dei due materiali funzionante, inoltre il calcestruzzo protegge le barre dal fuoco ritardando il collasso della struttura e dalla corrosione in quanto ha valori di pH elevati e mantiene in condizioni di passività le armature.

Grazie alla combinazione delle caratteristiche meccaniche dei due materiali si passa dalla costruzione di sezioni di grandi dimensioni a sezioni più snelle, con una geometria variabile di

elevata rigidezza, inoltre si riscontrano diversi vantaggi anche dal punto di vista del comportamento a trazione della sezione, grazie alla presenza delle barre di armatura.

L'aderenza tra barre di armatura e calcestruzzo permette la trasmissione degli sforzi nell'interfaccia di contatto tra i due materiali, questa aderenza incrementa quando si utilizzando barre ad aderenza migliorata che presentano delle nervature.

Il calcestruzzo armato oltre ad avere delle eccellenti prestazioni strutturali ha anche qualche criticità, bisogna infatti porre particolare attenzione ai fenomeni di degrado. Con il trascorrere degli anni si fanno ormai sempre più evidenti i problemi di degrado e corrosione nelle strutture in cemento armato, degrado rilevabile attraverso ispezioni visive, come ad esempio nei casi di spalling e delaminazione del copriferro.

I fenomeni di degrado possono scaturire da vari fattori quali la scarsa manutenzione, errori progettuali, la fessurazione stessa del calcestruzzo armato dovuta agli elevati cicli di carico che deve sopportare negli anni; in generale, è possibile associare i vari fattori a meccanismi chimici, fisici e meccanici che con il passare del tempo deteriorano le strutture.

Questi fenomeni riducono la vita utile della struttura e quindi si ha una perdita di capacità per la quale la struttura era stata progettata, comportando un aumento dei costi per la manutenzione o addirittura in alcuni casi la dismissione prematura della struttura stessa.

Si deve quindi porre particolare attenzione alla durabilità ovvero la capacità di mantenere inalterate, con il trascorrere del tempo, le caratteristiche di un elemento o del materiale. La classe di esposizione ci indica quanto è aggressivo l'ambiente dove si troverà la struttura ed in funzione di essa vengono scelti tre parametri fondamentali che influenzano la durabilità: il rapporto acqua cemento, il copriferro e la tipologia e contenuto di cemento.

Nel presente lavoro di tesi sono stati analizzati i principali fenomeni di degrado delle strutture in cemento armato e cemento armato precompresso e quindi le relative prove che si possono effettuare per determinarne le cause e la gravità.

La valutazione del degrado strutturale è stata trattata anche dal punto di vista sperimentale su travi in calcestruzzo armato precompresso appartenenti ad un viadotto sito in Torino, dismesso dopo aver raggiunto la fine della vita utile. Il viadotto fu costruito nel 1970 e venne realizzato con travi in semplice appoggio completato da due travi trasversali intermedie e una soletta in calcestruzzo gettata in opera.

In particolare sono state oggetto di esame 25 travi prefabbricate a doppio T, prelevate da varie zone dell'impalcato con diverse esposizioni, ed è stato valutato lo stato di degrado dal punto di vista della corrosione correlando i risultati ottenuti dalle ispezioni visive con le misure di resistività del calcestruzzo, di potenziale e velocità di corrosione.

1 Descrizione dei fenomeni di degrado nel calcestruzzo armato

1.1 Degrado nel calcestruzzo

Anche se il calcestruzzo armato si presta bene alla realizzazione di opere in ambito civile, può presentare dei problemi di degrado e quindi di durabilità, in quanto i materiali che lo costituiscono sono vulnerabili alle azioni ambientali. È quindi opportuno conoscere e valutare i vari fenomeni di degrado e prevenirli in fase di progettazione dell'opera o trovare una soluzione di mitigazione per gli edifici esistenti.

Figura 2 – Degrado di un ponte in calcestruzzo armato [Fonte: https://www.ingenio-web.it/21621-garantire-la-durabilita-di-unopera-in-calcestruzzo-partendo-dalla-conoscenza-dei-fenomeni-di-degrado]

In fase di progettazione è importante considerare alcuni aspetti che potrebbero innescare il degrado nel calcestruzzo:

- Il rapporto acqua/cemento che determina la porosità e quindi la permeabilità dell'elemento strutturale a quelle sostanze che risultano "nocive" sia per il calcestruzzo che per l'armatura;
- Limitare il cloruro totale nel calcestruzzo che comporta un attacco interno da cloruri;
- Gli sforzi di trazione nel calcestruzzo rappresentano un problema non solo in termini di resistenza del calcestruzzo, ma anche in termini di durabilità. Considerata la scarsa resistenza del materiale a trazione bisogna cercare di ridurre tali sforzi in modo da evitare il più possibile l'apertura delle fessure, che faciliterebbero l'infiltrazione di agenti aggressivi all'interno della struttura;
- La progettazione di un copriferro adeguato alla classe di esposizione dell'elemento considerato, permette una maggiore durabilità dell'opera. Il copriferro protegge le armature dall'ambiente esterno e diminuisce esponenzialmente la velocità di penetrazione dei cloruri;

- Evitare zone di ristagno dell'acqua e progettare un sistema di regimentazione adeguato ad allontanare le acque superficiali.

Si presentano di seguito i principali fenomeni di degrado.

1.1.1 Dilavamento del calcestruzzo

Il dilavamento del calcestruzzo avviene principalmente in opere idrauliche ovvero quando il calcestruzzo entra in contatto con acqua contenente un'alta percentuale di anidride carbonica, trasformando la calce in carbonato di calcio e poi in bicarbonato di calcio che lo rende molto solubile e dilavabile dall'acqua.

La parte superficiale del calcestruzzo tende a staccarsi, in particolare la pasta di cemento e scoprendo gli inerti favorisce le infiltrazioni d'acqua.

Figura 3 – Effetto del dilavamento nel calcestruzzo [Fonte: Felitti, Matteo, and Lucia Rosaria Mecca. Il Degrado Delle Strutture in Calcestruzzo Armato Diagnosi, Monitoraggio E Soluzioni per Il Recupero. Santarcangelo Di Romagna: Maggioli, 2018]

1.1.2 Carbonatazione del calcestruzzo

In generale si può affermare che una struttura in calcestruzzo in ottime condizioni presenta valori di pH elevati, compresi tra 13-14 ed il calcestruzzo in questi casi svolge un ruolo protettivo per le armature mantenendole in condizione di passività.

Nel momento in cui si innesca il fenomeno della carbonatazione, quindi l'anidride carbonica riesce a penetrare nei pori del calcestruzzo, il pH del calcestruzzo inizia a decrescere e la profondità del fenomeno aumenta fino ad arrivare in corrispondenza dell'armatura e questo comporta una rottura del film protettivo dei ferri.

Figura 4 – Effetto della carbonatazione nel calcestruzzo armato [Fonte: https://www.gruppomigliaccio.com/wp-content/uploads/2019/11/DSC04251-600x450.jpg]

Come si può notare in Fig. 4 i ferri rimangono esposti all'azione dell'anidride carbonica, ma soprattutto sono esposti ad ossigeno e acqua.

Queste condizioni innescano nelle barre di armatura un processo di ossidazione, che può aumentare il volume delle armature di circa 6 volte, generando quindi tensioni circonferenziali nel calcestruzzo, portando anche ad un distaccamento del copriferro e quindi ad un aumento di velocità di corrosione.

Il rapporto acqua/cemento è importante per prevenire questo fenomeno, durante l'evaporazione si creano dei vuoti e utilizzando un rapporto a/c alto avremo alla fine una percentuale dei vuoti maggiore e quindi un calcestruzzo più poroso che faciliterebbe il fenomeno della carbonatazione.

1.1.3 Aggressione da solfati

Lo ione solfato attacca il calcestruzzo sia esternamente che internamente (Fig.5), in quanto si può trovare negli aggregati del calcestruzzo sotto forma di gesso oppure nei terreni o nell'acqua. La presenza di solfati nell'acqua causa una reazione con gli alluminati e i silicati contenuti nel cemento che vengono trasformati in ettringite, provocando un aumento di volume che comporta la fessurazione e la disgregazione del calcestruzzo.

La formazione di ettringite non sempre crea dei danni alla struttura, almeno quando si parla di ettringite primaria che si crea dopo la fase di miscelazione del calcestruzzo ovvero dopo poche ore e non produce stress. Differente è invece l'ettringite secondaria che tendenzialmente si forma dopo mesi o anni ed è in questo caso che il volume aumenta producendo uno stato tensionale nel calcestruzzo indurito.

Figura 5 - Degrado di un canale per attacco solfatico delle acque e formazione di ettringite secondaria [Fonte: https://www.encosrl.it/wp-content/uploads/2017/08/Figura-2.jpg]

1.1.4 Aggressione da cloruri

Un aggressione da cloruri è più frequente in zone marine oppure in quelle zone dove vengono utilizzati i sali disgelanti. I cloruri danneggiano sia il calcestruzzo che le armature (Fig.6).

Inizialmente penetrano nella superficie del calcestruzzo con una velocità che è influenzata dalla quantità di cloruri presenti nello strato superficiale del calcestruzzo, dalla permeabilità del calcestruzzo, dalla temperatura ed in particolare dall'umidità che gioca un ruolo fondamentale nella corrosione delle barre di armatura.

Figura 6 - Degrado da cloruri nel calcestruzzo armato [Fonte: Felitti, Matteo, and Lucia Rosaria Mecca. Il Degrado Delle Strutture in Calcestruzzo Armato Diagnosi, Monitoraggio E Soluzioni per Il Recupero. Santarcangelo Di Romagna: Maggioli, 2018.]

Prendendo in considerazione un ambiente che presenta un'alta percentuale di cloruri, ma allo stesso tempo i pori del calcestruzzo risultano saturi di umidità, in questo caso l'ossigeno non riesce a infiltrarsi e quindi non riuscirà a corrodere le barre di armatura. La corrosione da parte dei cloruri

può essere in alcuni casi per concentrazioni elevate di cloruri diffusa oppure si ha una perdita di massa della barra localizzata (pitting Fig.7).

Figura 7 – Corrosione da cloruri localizzata (pitting) [Fonte: Pedeferri, Pietro. Corrosion Science and Engineering. Cham: Springer International, 2018.]

1.1.5 Fenomeni di gelo-disgelo

La combinazione tra l'abbassamento della temperatura intorno a 0°C e la presenza di acqua nel calcestruzzo, che può provenire da un elevato rapporto acqua/cemento o può infiltrarsi dall'esterno, può comportare dei cicli di gelo-disgelo.

All'interno della struttura non tutta l'acqua congela nello stesso momento, questo è dovuto alla differenza di temperatura all'interno della struttura stessa, nel momento in cui l'acqua presente all'interno di alcuni pori congela aumenta il proprio volume del 9% circa, costringendo l'acqua allo stato liquido a spostarsi in altre cavità vicine, nel caso in cui non ci sono cavità nelle vicinanze l'aumento del volume genera una pressione interna nel calcestruzzo. La ripetizione ciclica di questo fenomeno porta ad una rottura a fatica nelle strutture in calcestruzzo.

1.1.6 Effetto delle temperature elevate

L'esposizione del calcestruzzo armato a temperature elevate, come quelle raggiunte in un incendio, comporta dei gravi danni nelle strutture. Il calcestruzzo resiste a temperature più elevate rispetto

alle armature, quindi il copriferro ha un ruolo protettivo nei confronti dell'armatura, questa caratteristica comporta che le barre impiegano più tempo a raggiungere temperature elevate. L'importanza di proteggere le barre è dovuta ai problemi che insorgerebbero nel caso in cui le barre dovessero raggiungere la temperatura critica di circa 500° C , che risulta inferiore alla temperatura critica del calcestruzzo, si verificherebbe una notevole riduzione del carico di snervamento e causerebbe, oltre al collasso della struttura, una differente dilatazione tra calcestruzzo e acciaio che non garantirebbe la perfetta aderenza tra i due materiali creando delle tensioni nel calcestruzzo e causandone l'espulsione.

1.1.7 Effetto della fessurazione

La fessurazione è un fenomeno che non va sottovalutato ai fini della durabilità di un'opera, infatti anche la normativa ci impone di progettare le strutture mantenendo l'ampiezza della fessure al di sotto di determinati limiti, in modo tale da limitare i danni che potrebbe causare.

I fenomeni descritti nei precedenti paragrafi generano una riduzione, almeno nel breve termine, locale delle caratteristiche meccaniche di un elemento.

Le fessure invece creano diversi problemi sia localmente che globalmente:

- Velocizza la penetrazione all'interno della sezione di quelle sostanze (descritte nei paragrafi precedenti) che causerebbero il deterioramento della struttura in tempi ancora più previ.
- La sezione resistente di un elemento andrebbe a ridursi e questo genererebbe una ridistribuzione e una concentrazione degli sforzi all'interno dell'elemento o della struttura.
- Con il tempo porterà ad una nuova fessurazione e quindi ad una nuova riduzione della sezione resistente finché la tensione agente non supererà la tensione resistente.
- Permette il contatto tra le barre di armatura e l'ambiente esterno, facendo perdere dunque quel "ruolo" protettivo che il calcestruzzo svolge nei confronti dell'armatura, che una volta entrata in contatto con l'ambiente esterno tende a corrodersi e con il tempo ad aumentare il proprio volume fessurando maggiormente l'elemento in calcestruzzo.

1.2 La corrosione delle armature

Ultimamente si notano sempre di più i fenomeni della corrosione nelle opere civili e i vari effetti che produce. L'aspetto economico è legato all'ambiente aggressivo alla quale è soggetta la struttura durante la sua vita utile, infatti anche nel caso di strutture ben progettate nei confronti della durabilità soggette ad un ambiente aggressivo è necessaria sia la manutenzione ordinaria che straordinaria, aumentando notevolmente i costi di mantenimento della struttura.

Figura 8 - Fenomeni della corrosione nelle opere civili [Fonte: https://www.positanonews.it/2018/09/carbonatazione-male-occulto-del-cemento-armato/3264830/]

In alcuni casi la manutenzione e gli interventi anche invasivi non sono sufficienti ed è quindi necessario dismettere la struttura anche preventivamente rispetto quella che era la sua vita utile per la quale era stata progettata, comportando dei costi sia per la demolizione e lo smaltimento e la costruzione di una nuova struttura che sostituisca la precedente.

1.2.1 La corrosione dal punto di vista elettrochimico

Uno dei maggiori problemi che riguardano il calcestruzzo armato e tutto ciò che viene realizzato con esso è la corrosione. Al fine di realizzare un'opera duratura nel tempo e che rispetti le condizioni di sicurezza e la vita utile stabilita da normativa è importante conoscere a priori il fenomeno della corrosione.

Nel calcestruzzo armato le armature sono annegate nel calcestruzzo, esso svolge una funzione di protezione delle barre dovuto al suo pH elevato che crea un ambiente passivo e quindi permette alle barre di ricoprirsi di un film protettivo che ne azzera la velocità di corrosione.

Il fenomeno della corrosione è un processo elettrochimico, che si innesca per la presenza di acqua e ossigeno a contatto con le barre di armatura (Fig. 9), "generando un sistema simile alla cella elettrochimica" [9] tra l'anodo e il catodo. Questo fenomeno si verifica solamente quando il circuito è chiuso; se il circuito è interrotto in un punto qualsiasi, per esempio quando l'acqua non è a contatto con il ferro, la cella non può funzionare e quindi non si verifica la corrosione.

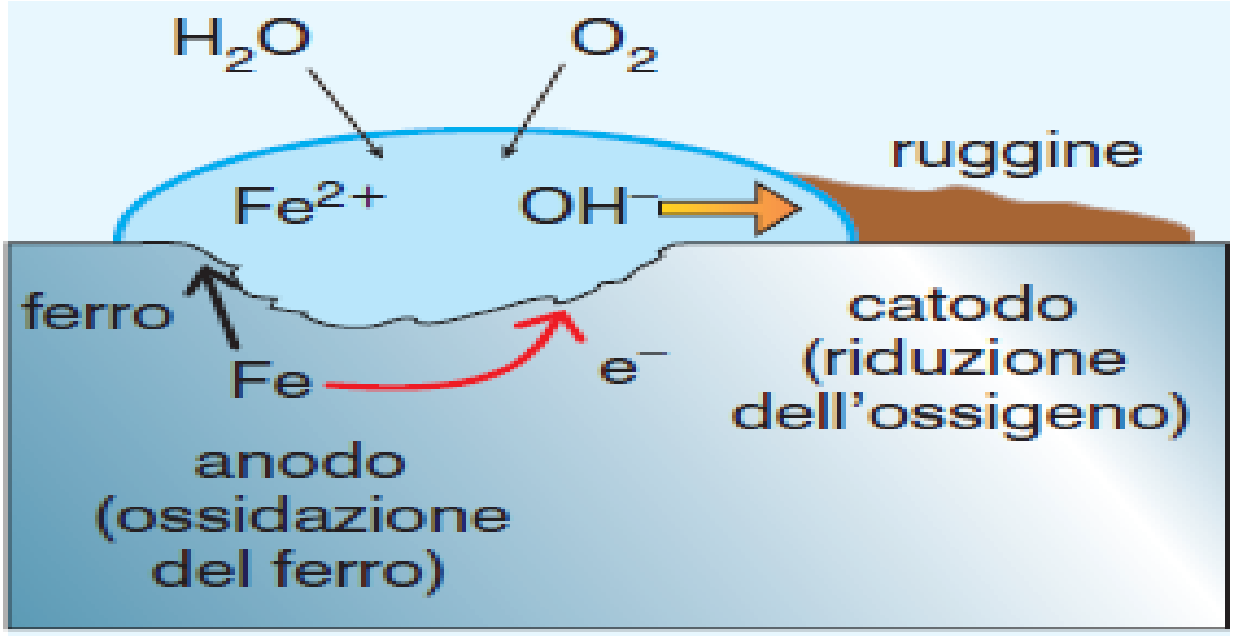


Figura 9 – Processo elettrochimico con formazione della rugine [Fonte: Bagatti, Corradi, Desco, Ropa, Chimica, Zanichelli Editore, 2012]

La zona anodica si crea nella zona in cui si ossida il ferro tramite la reazione anodica:

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2\ e^-$$

Avviene quindi la trasformazione da metallo a ione ferroso. Gli elettroni liberati dall'anodo migrano verso un'altra zona detta zona catodica che in generale comporta la riduzione dell'ossigeno in presenza di acqua, generando la reazione catodica:

$$O_2 + 2\ H_2O + 4\ e^- \rightarrow 4\ OH^-$$

Gli ioni Fe^{2+} e OH^- formano l'idrossido ferroso:

$$Fe^{2+} + 2\ OH^- \rightarrow Fe(OH)_2$$

Che a contatto con ossigeno e acqua si ossida e diventa $Fe(OH)_3$ formando ossido idrato Fe_2O_3 e quindi si trasforma in ruggine. A differenza del ferro la ruggine è porosa inoltre si stacca dal ferro lasciandolo esposto all'ossidazione e alla creazione di altra ruggine.

In funzione dell'area di estensione questo fenomeno può essere classificato in:

- Corrosione diffusa: si può chiamare tale quando l'area interessata dalla corrosione si estende ad una grande parte della superficie o su tutta la superficie.
- Corrosione locale: in questo caso l'area interessata dalla corrosione è molto piccola e la corrosione riguarda solo alcuni punti, un esempio è il pitting.

La corrosione viene influenzata dal pH della soluzione a contatto con il metallo e dal potenziale tra il metallo e la soluzione stessa. Il diagramma di Pourbaix per il ferro (Fig. 10) riassume i fenomeni che possono accadere, riguardanti la corrosione, in funzione del pH della soluzione e del potenziale tra metallo e soluzione.

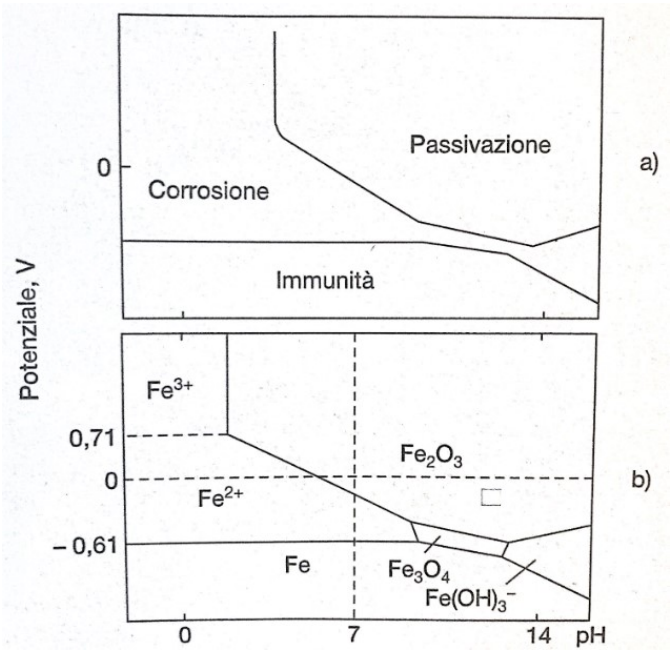


Figura 10 – Diagramma di Pourbaix: a) situazione di corrosione b) fasi stabili [Fonte: Alunno Rossetti, Vito. Il Calcestruzzo Materiali E Tecnologia. 3.rd ed. Milano: McGraw-Hill, 2007.]

Analizzando il diagramma di Pourbaix in funzione di pH e del valore del potenziale delle barre rispetto alla soluzione acquosa, considerando il potenziale che varia tra i -100 mV/CSE e -300 mV e il pH del calcestruzzo che generalmente è circa 14, si può notare che ricadiamo nella zona di passivazione e quindi non si può generare la reazione anodica. Nel paragrafo 1.2.2 verranno spiegate nel dettaglio le zone che si formano e le caratteristiche anodiche e catodiche.

1.2.2 Caratteristiche anodiche, catodiche e condizione di corrosione

La presenza del metallo all'intero del calcestruzzo, che è un materiale poroso dove è presente dell'acqua contenente dei sali, genera una alterazione di potenziale elettrico formando delle zone anodiche e zone catodiche generando passaggi di corrente.

Nelle zone anodiche avviene l'ossidazione del ferro che dà luogo ai prodotti della corrosione, affinché questo avvenga è necessario che vi sia umidità che entra a contatto con la superficie del ferro.

In Fig. 11 viene schematizzata la caratteristica anodica di un'armatura a contatto con una soluzione satura di idrossido di calcio, rappresentativa di calcestruzzo non carbonatato e senza cloruri.

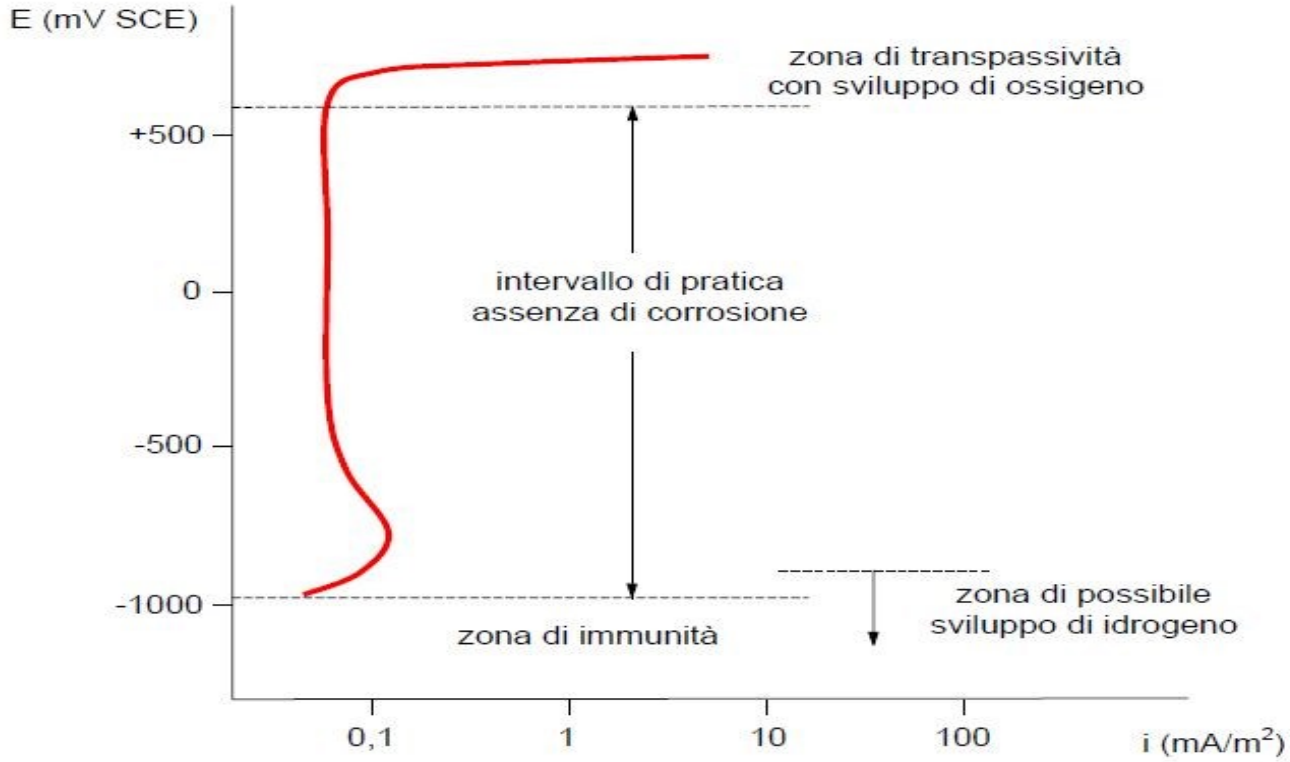


Figura 11 – Andamento schematico della caratteristica anodica dell'acciaio in calcestruzzi non carbonatati e non contenenti cloruri. [Fonte: Bossio, Antonio. Corrosione E Diagnostica Delle Strutture in Calcestruzzo Armato Criteri Di Intervento E Di Ripristino Conservativo. Assago: Wolters Kluwer, 2014.]

Si può notare che vi sono 4 zone all'interno del diagramma:

- Zona di transpassività: Per valori del potenziale che superano i +600 mV/CSE, l'acciaio entra nella zona di transpassività sviluppandosi ossigeno e producendo acidità seguendo la reazione anodica $2 \cdot H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$
- Zona di passività: Per valori del potenziale compresi tra i +600 mV/CSE e -800 mV/CSE, l'armatura è protetta da un film di ossido sottile e il passaggio di corrente anodica è trascurabile
- Zona di possibile sviluppo di idrogeno: Per valori del potenziale compresi tra i -800 mV/CSE e -1000mV/CSE, il film di ossido sottile non si crea, lasciando quindi le armature più esposte al fenomeno della corrosione, ma con bassa velocità di corrosione
- Zona di immunità: Per valori di potenziale -1000Mv/CSE, avviene la reazione di equilibrio $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2\,e^-$ quindi il passaggio dallo stato metallico allo stato di ione ferroso e si ossidano le armature. Per valori inferiori, le armature si trovano nella zona di immunità.

In Fig. 12 è rappresentato la cinetica del processo si riduzione di ossigeno.

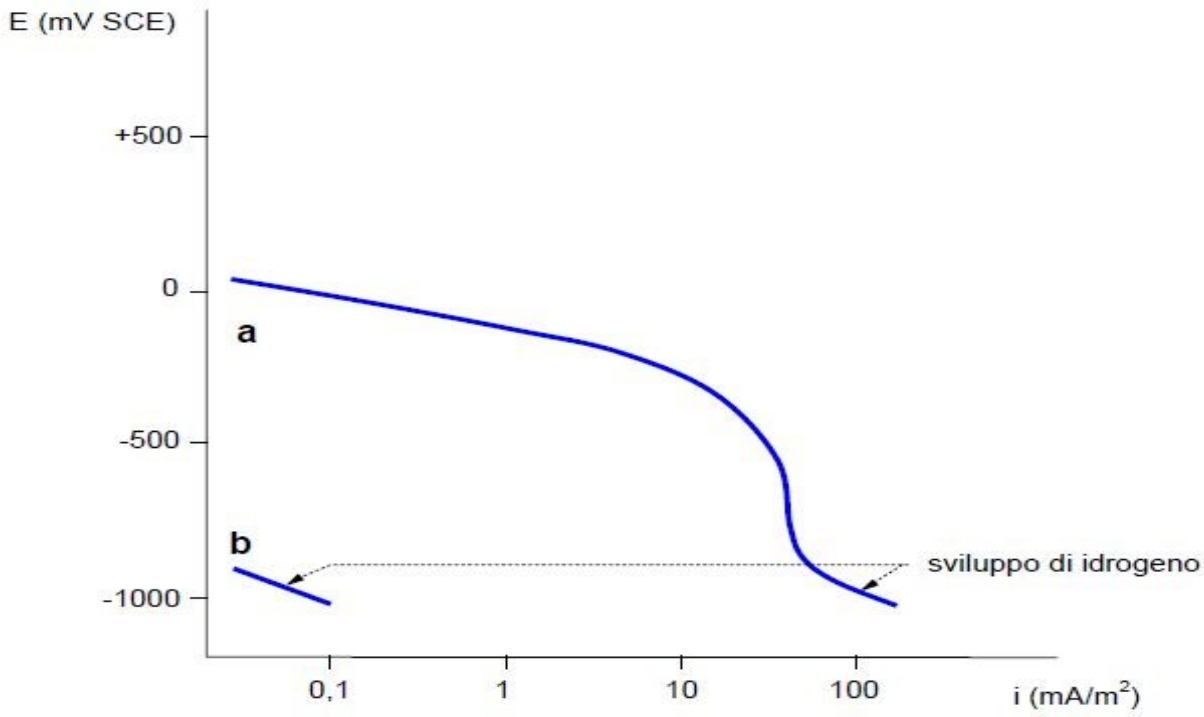


Figura 12 – Andamento schematico della caratteristica catodica dell'acciaio in soluzione alcalina. [Fonte: Bossio, Antonio. Corrosione E Diagnostica Delle Strutture in Calcestruzzo Armato Criteri Di Intervento E Di Ripristino Conservativo. Assago: Wolters Kluwer, 2014.]

Per potenziali inferiori a 0 mV/CSE la velocità di riduzione di ossigeno inizia a crescere e tende ad una velocità massima con la quale l'ossigeno arriva nella superficie delle armature. La velocità massima decresce all'aumentare della percentuale di acqua contenuta nel calcestruzzo.

Dalla Fig. 12 si nota anche che per valori del potenziale minori di -900 mV/CSE, oltre a ridursi l'ossigeno, inizia a svilupparsi l'idrogeno e la densità di corrente catodica aumenta. Nel caso di calcestruzzo saturo si sviluppa l'idrogeno e la curva caratteristica catodica è la curva b in Fig. 12.

Dall'incontro delle curve di caratteristica anodica e catodica Fig. 13 si ottengono le condizioni di corrosione, trascurando la caduta ohmica che è dovuta al passaggio della corrente tra zona anodica e catodica.

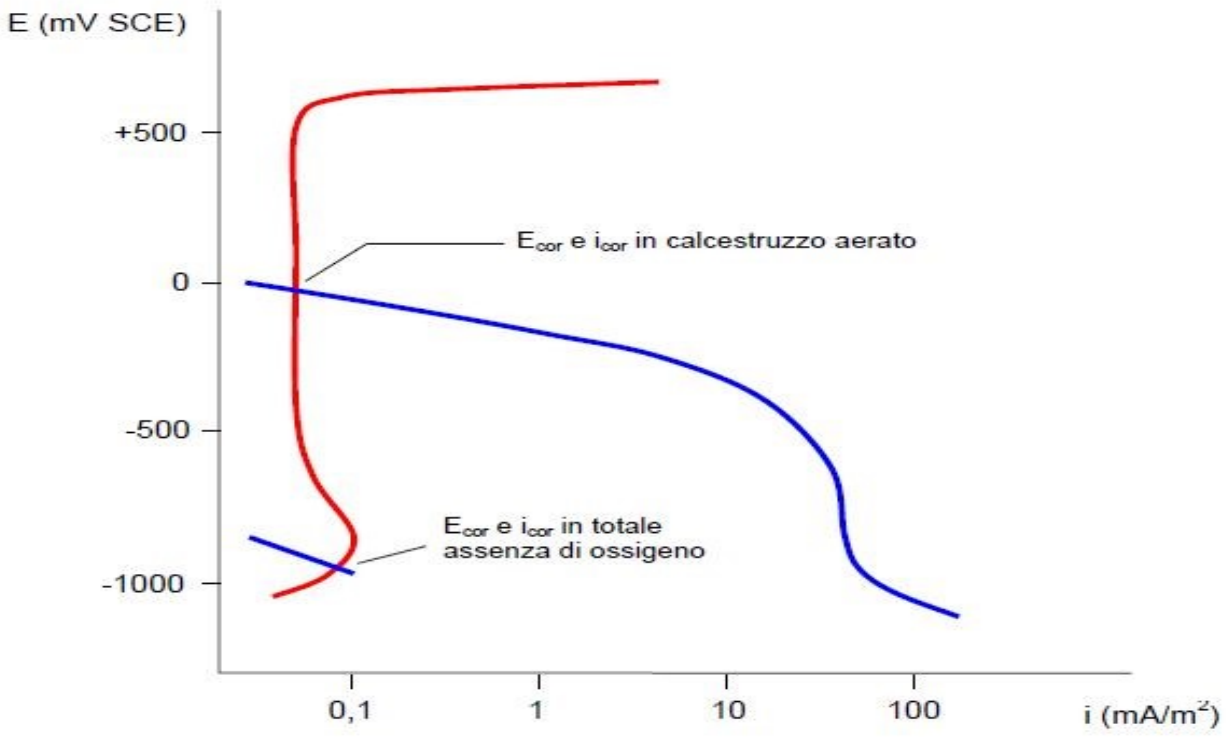


Figura 13 – Schematizzazione delle condizioni di corrosione delle armature [Fonte: Bossio, Antonio. Corrosione E Diagnostica Delle Strutture in Calcestruzzo Armato Criteri Di Intervento E Di Ripristino Conservativo. Assago: Wolters Kluwer, 2014.]

Come descritto in precedenza, per mancanza di ossigeno o per bassa presenza di ossigeno la velocità di corrosione è bassa e per avere tali condizioni il calcestruzzo dovrebbe essere saturo d'acqua, risulterebbe comunque difficile raggiungere valori di potenziali così bassi. "E_{corr} il potenziale di corrosione delle armature passive" [5] varia tra valori massimi e minimi, in funzione dell'aggressività dell'ambiente, che non comprendono la zona di transpassività e di immunità.

1.2.3 Perdita di passività e propagazione della corrosione

Il fenomeno del degrado del calcestruzzo, trattato nel precedente paragrafo, non è un fenomeno che riguarda soltanto il calcestruzzo, ma bensì riguarda anche le armature nel caso di calcestruzzo armato. Il calcestruzzo ha delle caratteristiche protettive nei confronti dell'armatura, la protegge dall'ambiente esterno grazie al suo pH elevato che permette lo sviluppo nella superficie delle barre di armature di un film di ossido protettivo.

Tutto questo è possibile finché la condizione di passivazione dell'acciaio rimane immutata nel tempo, ma diversi sono i fattori che influenzano le caratteristiche passivanti del calcestruzzo, impedendo quindi alle armature di rimanere in perfette condizioni e disgregando il film di ossido che protegge le armature dando inizio al fenomeno della corrosione.

Come illustrato nel diagramma di Tuutti [10] Fig. 14 la vita utile della struttura può essere schematizzata in due fasi che si dividono in:

- Fase di innesco della corrosione: l'intervallo di tempo che inizia con la realizzazione della struttura e finisce nel momento in cui gli agenti aggressivi riescono a penetrare il calcestruzzo arrivando nelle barre di armatura, che comporta la riduzione delle condizioni di passività fino alla distruzione del film protettivo.

- Fase di propagazione: che inizia dopo la distruzione del film protettivo, con una velocità variabile della propagazione della corrosione, fino ad arrivare ad una penetrazione massima della corrosione e quindi alla fine della vita utile della struttura.

Figura 14 – Modello di Tuutti che rappresenta i periodi di innesco e di propagazione della corrosione in una struttura in calcestruzzo armato. [Fonte: Tuutti K., "Corrosion of steel in concrete", Swedish cement and concrete institute (CIB), No: 4-82, Stockholm, 1982.]

Alcuni di questi fattori, che causano il degrado delle strutture in calcestruzzo armato e quindi portano alla riduzione delle vita utile, sono:

- La porosità del calcestruzzo che svolge un ruolo determinante nell'impedire il passaggio, verso le armature, di acqua ossigeno e anidride carbonica che danno origine al fenomeno della carbonatazione, abbassando il pH e riducendo quindi le caratteristiche passivanti del calcestruzzo fino ad arrivare alle armature ed all'eliminazione del film protettivo.
- La presenza di cloruri che tendono a penetrare il calcestruzzo fino ad arrivare nelle armature, possono generare la rimozione locale del film protettivo, creando un fenomeno di corrosione localizzato generalmente chiamato pitting.
- Corrosione sotto tensione

1.2.4 Effetti della carbonatazione nelle barre di armatura

Il fenomeno della carbonatazione riguarda in modo diretto il calcestruzzo, ma indirettamente riguarda le barre di armatura. L'anidride carbonica penetra, attraverso i pori, nel calcestruzzo e si combina chimicamente con la calce presente nel calcestruzzo e con altri idrossidi, come idrossido di sodio e potassio, generando una reazione che trasforma la calce in calcare (carbonato di calcio) chiamata reazione di carbonatazione:

$$CO_2 + Ca(OH)_2 \xrightarrow{H_2O,\ NaOH} CaCO_3 + H_2O$$

Il passaggio che avviene durante questo fenomeno, ovvero la formazione di calcare, diminuisce la porosità, inoltre non ha effetti negativi per quanto riguarda la resistenza meccanica del solo calcestruzzo. Tuttavia nel caso di calcestruzzo armato il problema del fenomeno della carbonatazione si presenta nelle barre di armatura, in quanto il calcestruzzo aveva un pH elevato,

intorno ai 13 pH, ma una volta avvenuta la reazione e quindi la formazione di calcare, il pH scende con valori di pH intorno ai 9.

Tale valore è inferiore al valore minimo di pH che garantisce alle barre di armature le condizioni di passività che è intorno ai 11,5 (nel caso in cui non siano presenti cloruri), quindi l'ossido protettivo si rompe lasciando le armature esposte ad acqua e ossigeno, che innescano il fenomeno della corrosione.

Il ferro "arrugginendo" forma l'ossido idrato Fe_2O_3 che ha un volume maggiore rispetto al ferro, si riduce quindi la sezione resistente delle barre e aumenta il volume dell'ossido generando delle tensioni, all'interfaccia tra il calcestruzzo e le barre, che porta alla fessurazione ed espulsione del copriferro (spalling), le armature rimangono quindi a diretto contatto con l'ambiente causando un aumento della velocità di corrosione oltre che la riduzione di aderenza e possibili fenomeni di instabilità.

La carbonatazione inizialmente interessa la superficie esterna del calcestruzzo e si sposta nel tempo verso le zone interne Fig. 15.

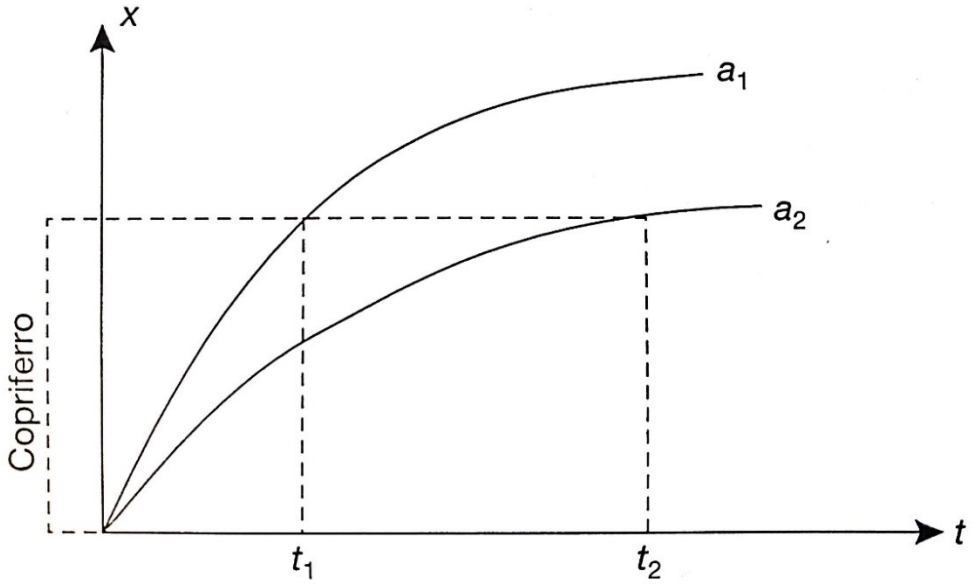


Figura 15 – Andamento penetrazione carbonatazione nel calcestruzzo; curva a_1 calcestruzzo con una permeabilità maggiore. [Fonte: Alunno Rossetti, Vito. Il Calcestruzzo Materiali E Tecnologia. 3.rd ed. Milano: McGraw-Hill, 2007]

L'andamento può essere descritto dalla legge di penetrazione della carbonatazione [4]:

$$x = a\sqrt{t}$$

Dove la variazione del parametro a dipende sia dal calcestruzzo (rapporto a/c, porosità, tipo di cemento) che dall'ambiente (umidità, temperatura), x è lo spessore del calcestruzzo carbonatato e t è il tempo. Si nota quindi l'importanza della scelta dello spessore del copriferro che ricopre un ruolo fondamentale nel fare aumentare il tempo che la carbonatazione impiega a raggiungere le barre di armatura.

Un altro fattore importante che varia il fenomeno della carbonatazione è l'umidità relativa. Il trasporto, all'interno del calcestruzzo, di anidride carbonica avviene tramite i pori, quando questi sono vuoti il passaggio di anidride carbonica viene facilitato, mentre quando contengono acqua la

velocità di penetrazione viene rallenta. Di conseguenza aumentando l'umidità relativa diminuisce la velocità di penetrazione dell'anidride carbonica, infatti per calcestruzzi saturi tale velocità tende ad annullarsi.

1.2.5 Corrosione da cloruri

La corrosione dovuta da ioni cloruro è un fenomeno che avviene in modo frequente nelle armature, sia nelle opere marine sia per effetto dei sali disgelanti. La loro presenza all'interno delle strutture in calcestruzzo armato, porta alla distruzione del film protettivo, che per pH elevato avviene localmente (pitting Fig. 16).

Figura 16 –Corrosione da cloruri localizzata (pitting) [Fonte: Pedeferri, Pietro. Corrosion Science and Engineering. Cham: Springer International, 2018]

Il quantitativo di cloruri affinché la corrosione abbia luogo viene influenzato da diversi fattori come:

- Contenuto di umidità
- Rapporto acqua/cemento
- Tipo di cemento
- La compattazione del calcestruzzo
- La presenza di ossigeno

Considerando l'elevato numero di variabili si è posto un limite di contenuto massimo di cloruri che possono essere presenti all'interno del calcestruzzo affinché la depassivazione del film protettivo non si verifichi, in generale questo valore è 0.4% in relazione al peso del cemento.

Durante la corrosione locale delle armature dovuta ai cloruri (Pitting) si creano delle zone attive e passive. Nelle zone attive viene distrutto il film protettivo e fungono da anodo, mentre in quelle

limitrofe ovvero le zone passive dove ancora c'è il film protettivo fungono da catodo e avviene la riduzione dell'ossigeno, secondo la reazione [4]:

$$Fe + 3\ Cl^- \rightarrow FeCl^- + 2\ e$$

$$FeCl_3^- + 2\ OH^- \rightarrow Fe(OH)_2 + 3\ Cl^-$$

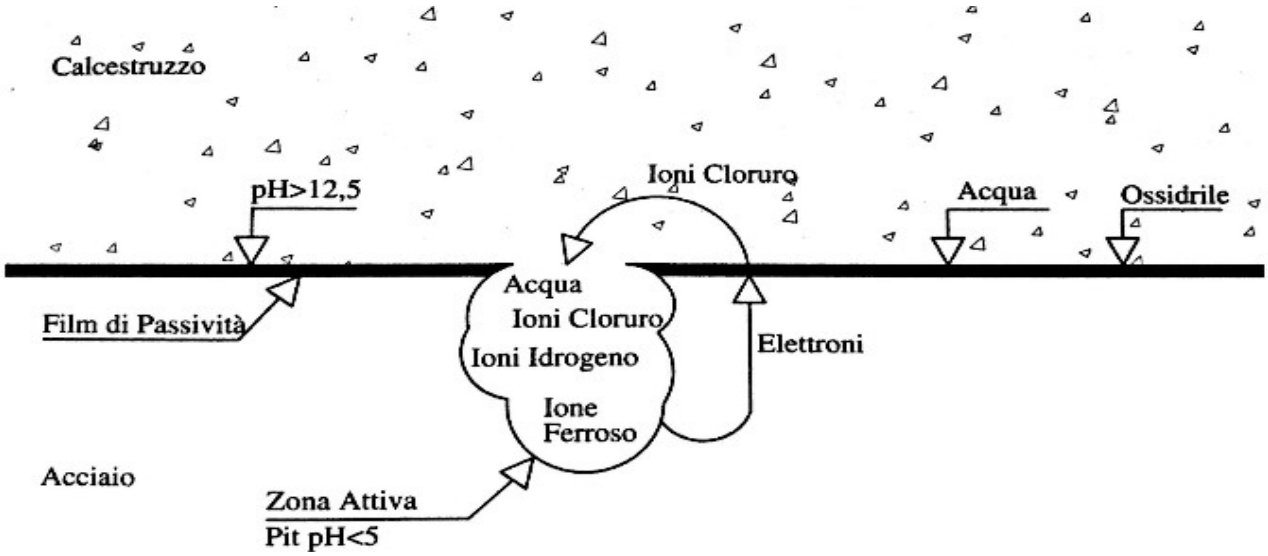


Figura 17 – Schema di un attacco di tipo pitting [Fonte: Bossio, Antonio. Corrosione E Diagnostica Delle Strutture in Calcestruzzo Armato Criteri Di Intervento E Di Ripristino Conservativo. Assago: Wolters Kluwer, 2014.]

Si crea un passaggio di corrente dovuta dalla differenza di potenziale tra il metallo e l'ossido, dalle zone anodiche a quelle catodiche, questo passaggio di corrente trasporta con sé i cloruri aumentando di conseguenza l'aggressività delle zone anodiche e diminuendo il pH, in queste zone, a valori minori di 5 (vedi Fig. 17), invece nelle zone catodiche circostanti il film protettivo delle armature tende a rinforzarsi e l'alcalinità aumenta.

2 Le tecniche di diagnostica strutturale

Nelle strutture in calcestruzzo armato esistenti assume un aspetto importante il monitoraggio delle condizioni strutturale che viene effettuato attraverso delle tecniche di diagnostica. Grazie a queste tecniche, che verranno descritte nei successivi paragrafi, si riesce a valutare lo stato di degrado dei materiali utilizzati nella realizzazione della struttura stessa; questo permette, laddove ve ne fosse la necessità, di intervenire tempestivamente nella struttura con interventi mirati a seconda del tipo di problema riscontrato durante le prove.

Prima di iniziare la diagnosi su un edificio è opportuno studiare la storia dell'edificio quindi cercare della documentazione esistente sull'edificio ed effettuare degli esami visivi in modo da poter tarare di volta in volta le prove da effettuare a seconda anche dell'importanza che ha la struttura in ambito storico, sociale ed economico.

L'esame visivo è accompagnato da un rilievo strutturale e con una documentazione fotografica, in modo da poter evidenziare al meglio quali possono essere le possibili cause di degrado. In molti casi in cui il degrado della struttura dovesse essere in uno stadio iniziale o le cause del degrado sono troppo complesse, il rilievo e l'esame visivo possono non essere sufficienti per stabilire se ci sono e quali sono le cause di degrado, si deve quindi procedere con indagini più approfondite.

2.1 Diagnosi attacco solfatico

Per capire se l'opera è soggetta ad un attacco solfatico si utilizza un'analisi chimica, che serve a stabilire la quantità di solfato SO_3 presente nel calcestruzzo. In generale il solfato è presente nel calcestruzzo, ovvero il solfato di calcio che regola la fase di presa che ha circa un valore da 0.4 a 0.6% rispetto al peso del calcestruzzo. Nel caso in cui l'analisi chimica dovesse restituire valori superiori allo 0.6% allora il degrado del calcestruzzo può essere attribuito all'attacco solfatico.

Se non si dispone del valore di solfato contenuto nel calcestruzzo né il contenuto di cemento con la quale è stato confezionato il calcestruzzo si procede analizzando il solfato in alcune zone del calcestruzzo degradate e non degradate, se il quantitativo di solfato dovesse risultare, in una zona degradata, maggiore del quantitativo che normalmente si trova nel calcestruzzo (0.4 a 0.6% rispetto al peso del calcestruzzo) si può considerare che il degrado è causato dai solfati.

L'analisi chimica serve principalmente a dare un'idea del contenuto di solfati nel calcestruzzo, ma dipende da alcuni fattori come:

- Le modalità di prelievo del campione
- La quantità di solfati che è riuscita a penetrare nel calcestruzzo

Questi fattori influenzano significativamente l'esito della diagnosi e fanno sì che la sola analisi chimica risulti insufficiente per una diagnosi accurata e quindi si ricorre all'analisi per diffrazione dei raggi X.

L'analisi per diffrazione dei raggi X (XRD da X-Ray Diffractometry), permette di identificare la presenza di argille e altri minerali, che sono contenuti nelle malte e nei calcestruzzi. Restituisce informazioni in dettaglio sulla struttura cristallografica dei materiali e consente di stabilire la quantità di solfato che è presente nel calcestruzzo e quindi se il degrado del calcestruzzo è imputabile ad un attacco di tipo solfatico.

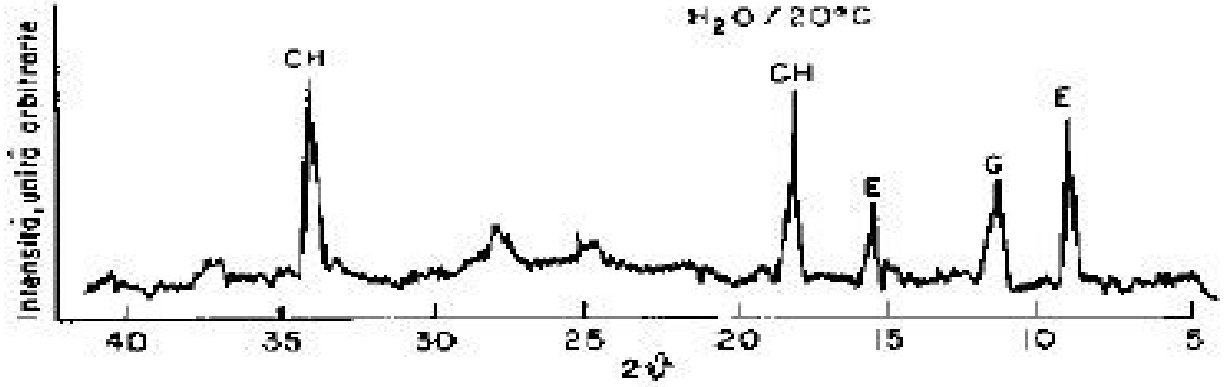


Figura 18 - Diffrattogramma ai raggi X effettuato su provini di calcestruzzo degradati da attacco solfatico [Fonte: L. Coppola, "La Diagnosi del Degrado delle Strutture in Calcestruzzo", L'Industria Italiana del Cemento, 681, pp. 657-666, Roma (1993).]

2.2 Diagnosi sulla corrosione dovuta ai cloruri

Anche in questo caso, per capire se l'opera è soggetta ad un attacco da cloruri si utilizza un'analisi chimica, che serve a stabilire la quantità di cloruri presente nel calcestruzzo. In generale anche il cloruro, così come il solfato, è presente nel calcestruzzo attraverso le materie prime che vengono utilizzate.

In base all'impiego del calcestruzzo armato, la classe di contenuto di cloruri che può essere presente all'interno varia e non deve superare il valore di 0.4% per il calcestruzzo armato e 0.2% per il calcestruzzo armato precompresso, espresso come percentuale di ioni cloruro rispetto alla massa del cemento.

Oltre all'analisi chimica, per stabilire se il degrado dell'opera è dovuta dagli ioni cloruro, si effettuano altre due prove:

- Analisi per diffrazione dei raggi X
- Prova colorimetrica alla fluoresceina

"L'analisi per diffrazione dei raggi X su un campione prelevato nello strato di calcestruzzo penetrato dal cloruro consente di evidenziare l'eventuale formazione di ossicloruro ($3CaO \cdot CaCl_2 \cdot 15H_2O$)" [14]

Per poter effettuare la prova colorimetrica alla fluoresceina è necessario prelevare una carota di calcestruzzo dalla struttura in analisi. Successivamente viene spruzzata sulla carota una soluzione di fluoresceina ed una soluzione di nitrato d'argento.

Attraverso la reazione chimica che avviene tra il cloruro e le altre due soluzioni, la zona della carota che è stata penetrata dal cloruro diventa rosa. Questa prova ci permette di determinare lo spessore raggiunto dagli ioni cloruro all'interno della struttura.

Figura 19 – Prova colorimetrica alla fluoresceina [Fonte: Collepardi, Mario, J. Jacob Ogoumah Olagot, Francesca Simonelli, and Roberto Troli. Il Calcestruzzo Vulnerabile Prevenzione, Diagnosi Del Degrado E Restauro. Villorba: Tintoretto, 2005.]

2.3 Diagnosi degrado da gelo-disgelo

Il degrado della struttura dovuto al fenomeno di gelo-disgelo può avvenire per:

- Basse temperature
- Presenza di umidità nel calcestruzzo
- Assenza di micro bolle di aria nella pasta di cemento

Inizialmente si raccolgono i dati storici riguardanti l'opera in esame e dopo aver accertato la presenza nel tempo delle basse temperature e dell'umidità all'interno del manufatto si procede alla verifica del terzo fattore ovvero l'assenza di micro bolle d'aria attraverso il microscopio ottico.

Non necessariamente ci deve essere la totale assenza di micro bolle d'aria affinché il degrado sia imputabile al fenomeno di gelo-disgelo, infatti tale fenomeno si può verificare anche in presenza delle micro bolle d'aria a seconda delle dimensioni e della spaziatura tra queste.

2.4 Diagnosi degrado da dilavamento e carbonatazione

L'anidride carbonica può causare due degradi differenti nelle opere in c.a.:

- Il dilavamento
- La carbonatazione

Il dilavamento, come visto precedentemente, causa la rimozione della pasta cementizia posta in superficie lasciando gli inerti in vista. In questo caso, una volta esclusa qualsiasi altra forma di degrado, basta un esame visivo per capire se il degrado della struttura è dovuta al fenomeno del dilavamento.

Nel caso della carbonatazione si utilizza un test colorimetrico contenente una soluzione a base di fenolftaleina. La superficie dove viene spruzzata la fenolftaleina si colora di rosa in un ambiente basico pH>10, rimane invece incolore se il calcestruzzo è carbonatato e quindi ha un pH < 10.

Questa prova (Fig.20) deve essere eseguita subito dopo l'estrazione della carota o l'espulsione del copriferro o la superficie di calcestruzzo esposta all'atmosfera nel tempo tende a carbonatarsi. La differenza di colore indica lo spessore di calcestruzzo che l'anidride carbonica ha penetrato.

Figura 20 – Carota in calcestruzzo colorata dalla fenolftaleina per effetto della carbonatazione [Fonte: https://www.structuralsurveys.it/indagini-su-strutture-in-calcestruzzo-carbonatazione-del-calcestruzzo/]

2.5 Prove non distruttive

2.5.1 Indagini pacometriche

Il pacometro Fig.21 è uno strumento digitale, viene utilizzato per localizzare le armature all'interno di una struttura, inoltre determina la direzione, il copriferro, l'interferro ed il diametro delle barre. È uno strumento maneggevole e leggero, è un metodo non distruttivo che permette di ridurre i tempi del rilievo. Il principio di funzionamento si basa sull'induzione del campo magnetico determinato dalla presenza di barre d'armatura.

Figura 21 – Pacometro [Fonte: Foto scattata in cantiere durante lo svolgimento della tesi sperimentale]

Dopo aver acceso lo strumento e aspettato qualche secondo per la calibrazione automatica e sufficiente appoggiare la sonda sulla superficie della struttura in analisi, in parallelo alla direzione presunta delle barre di armatura (Fig.22) e farlo scorrere lungo la superficie, se la sonda e la barra sono in asse lo strumento emette un suono acustico, inoltre l'indicatore di intensità del segnale raggiungerà il valore massimo e il copriferro il valore minimo della zona circostante.

Nel caso in cui vi sia la presenza di armature nelle due direzioni x e y è sufficiente far scorrere la sonda parallelamente a x e successivamente a y (o viceversa), in modo tale da rilevare l'esatta posizione delle armature nelle due direzioni.

Figura 22 – Indagine pacometrica [Fonte: Foto scattata in cantiere durante lo svolgimento della tesi sperimentale]

2.5.2 Indagini radar

Le indagini radar rientrano tra i metodi di indagine non distruttiva, viene utilizzato per:

- Localizzare le fratture
- Misurare il diametro delle armature
- Rilevare la presenza di cavità all'interno delle strutture
- Rilevare la presenza di armature metalliche all'interno della struttura e la loro posizione

Le indagini radar utilizzano delle onde elettromagnetiche di breve durata, la loro propagazione dipende dalle costanti dielettriche dei materiali, che a loro volta dipendono dallo stato fisico dei materiali stessi. Il dispositivo è formato dalle antenne emittenti e riceventi, che vengono spostate sulla superficie della struttura in esame e dall'apparato di elaborazione dei dati.

Il dispositivo trasmette in continuazione gli impulsi elettromagnetici che quando colpiscono le superfici di discontinuità, una parte dell'energia viene riflessa e l'altra parte penetra la superficie e viene riflessa da una superficie sottostante, l'energia riflessa viene captata e registrata.

Il risultato del rilievo radar è il radargramma Fig.23, ovvero una sezione continua spazio-tempo dell'oggetto. Con questo metodo è possibile quindi individuare cavità, armature e fratture all'interno delle strutture sia in calcestruzzo armato che in muratura.

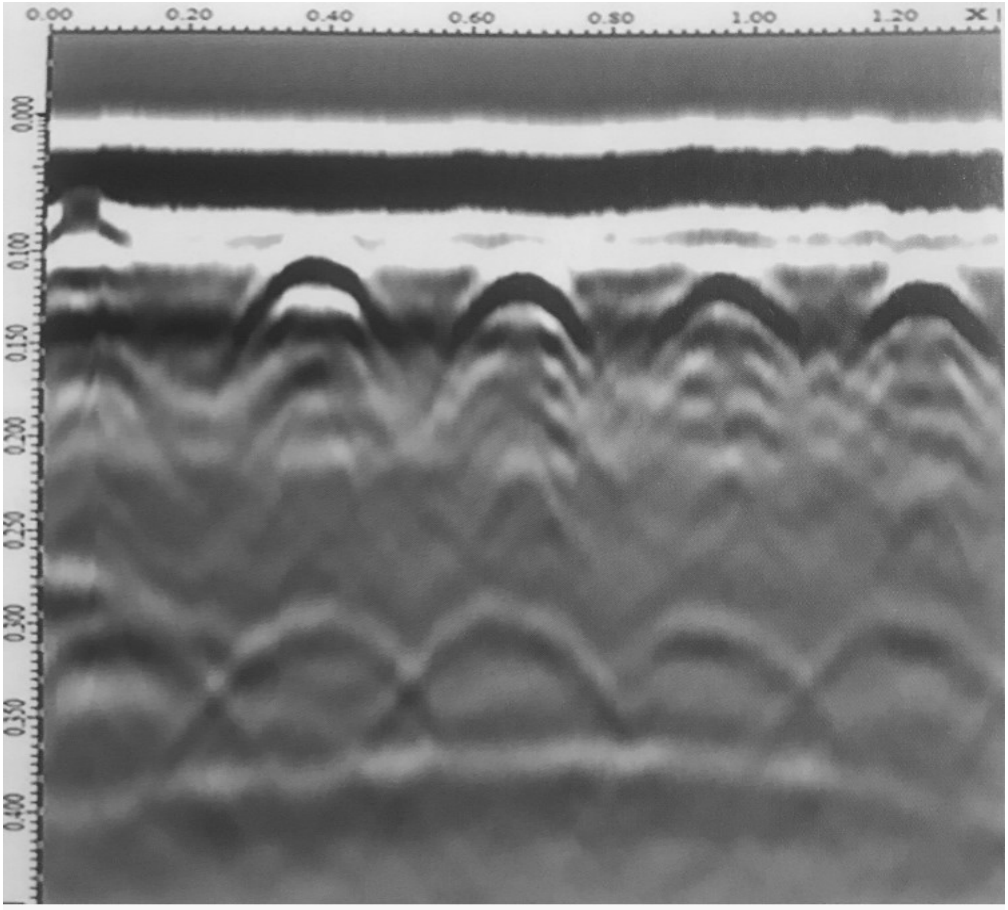


Figura 23 – Radargramma di una trave in c.a.p. [Fonte: Felitti, Matteo, and Lucia Rosaria Mecca. Il Degrado Delle Strutture in Calcestruzzo Armato Diagnosi, Monitoraggio E Soluzioni per Il Recupero. Santarcangelo Di Romagna: Maggioli, 2018.]

2.5.3 Potenziale di corrosione

La determinazione del potenziale di corrosione delle armature metalliche in una struttura permette di capire se l'armatura si trova in uno stato passivo oppure se è in corso un processo di corrosione. Per poter determinare il potenziale di corrosione viene effettuata un'indagine di tipo non distruttiva, in particolare si utilizza uno strumento che misura il potenziale di corrosione delle armature rispetto un elettrodo di riferimento compatibile con il calcestruzzo, in generale viene usato il solfato di rame $CuSO_4$ (CSE= Copper Sulfate Electrode).

In situ l'armatura viene collegata allo strumento attraverso dei cavi, in modo da creare un circuito chiuso, il potenziale viene misurato mettendo a contatto l'elettrodo di riferimento con la superficie del calcestruzzo utilizzando delle spugne imbevute d'acqua. Bisogna verificare la continuità elettrica delle armature e si può fare in diversi modi:

- Con l'ausilio di un multimetro si misura la resistenza elettrica tra le armature che per valori inferiori di 1 ohm confermano la continuità delle armature.

- Viene fatta circolare corrente elettrica tra le armature di circa 1mA, se il potenziale tra i due punti si differenzia di 10 mA e incrementa nel tempo allora le armature non sono continue.
- Si tiene fermo l'elettrodo di riferimento in un punto e si fa variare il punto di connessione dell'armatura, se la variazione del potenziale dell'armatura risulta essere minore di 1 mV allora le armature sono continue.

L'iCOR crea una mappatura del potenziale che consente d'individuare zone con potenziale diverso associando un colore al valore del potenziale rilevato nelle armature. I valori di potenziale sono influenzai da molti fattori come umidità, temperatura, spessore del copriferro, proprietà del calcestruzzo e quindi necessitano di essere correlati ad altri parametri per definire la condizione effettiva delle barre.

In funzione delle condizioni di corrosione delle armature vengono assunti diversi valori del potenziale (Fig. 24).

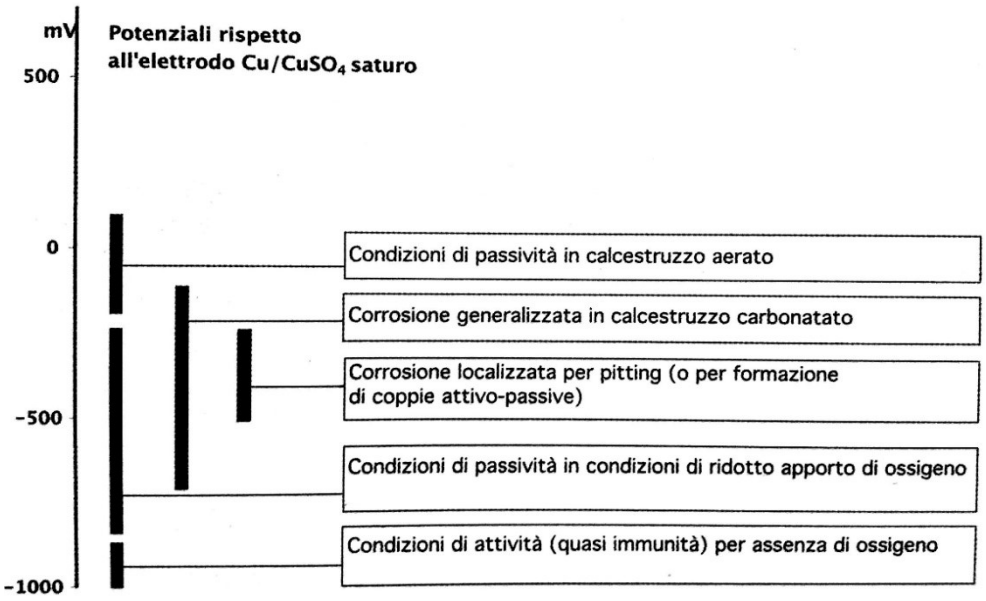


Figura 24 – Variazione del potenziale delle armature in acciaio in funzione alla condizione di corrosione [Fonte: Pucinotti, Raffaele. Patologia E Diagnostica Del Cemento Armato. Palermo: Flaccovio, 2006.]

2.5.4 Resistività del calcestruzzo

La misura della resistività elettrica del calcestruzzo viene usata per evidenziare eventuali zone di maggiore corrosione in una struttura o le variazioni che la struttura ha subito nel tempo. Utilizzando alcuni criteri empirici, di valenza generale, la velocità di corrosione per le armature depassivate può essere correlata alla resistività del calcestruzzo.

La resistività elettrica viene misurata utilizzando il metodo di Wenner. Questo metodo prevede che in fase di realizzazione siano inseriti quattro elettrodi tra le barre di armatura. La resistività elettrica si misurata facendo passare una corrente, I, tra i due elettrodi esterni e successivamente si misurata la differenza di potenziale, V, tra i due elettrodi interni, si indica con a la distanza in cm tra gli elettrodi. La resistività elettrica σ è data da [18]:

$$\sigma = 2\Pi a \frac{V}{I}$$

Tuttavia il metodo può presentare degli errori dovuti alla disomogeneità del calcestruzzo o strati di resistività diverse del calcestruzzo o dalle condizioni ambientali.

2.5.5 Velocità di corrosione

Il processo corrosivo comporta una perdita di massa dell'elemento corroso e quindi una riduzione di spessore. La velocità di corrosione può essere espressa come perdita di massa per unità di superficie nel tempo oppure come diminuzione dello spessore nell'unità di tempo.

Per misurare la velocità di corrosione può essere usata la misura di polarizzazione lineare, che consiste nell'impone a un'armatura una corrente esterna i, il suo potenziale subisce una variazione dE, il rapporto dE/i, detto resistenza di polarizzazione, è inversamente proporzionale alla velocità di corrosione. Vengono utilizzati tre elettrodi: l'armatura, l'elettrodo di riferimento e il contro-elettrodo che eroga corrente durante lo svolgimento della prova. Si polarizza il metallo in un intervallo molto piccolo (±10 mV) in questa zona il legame tra potenziale e corrente esterna si può assumere lineare. Si può dunque utilizzare la seguente equazione per calcolare la velocità di corrosione:

$$I_{cor} = \frac{B}{Rp}$$

B una costante determinata sperimentalmente ed R_p la resistenza di polarizzazione.

2.5.6 Misura sclerometrica

È possibile misurare in situ, indirettamente, la resistenza del calcestruzzo effettuando una prova non distruttiva tramite l'utilizzo dello sclerometro. Lo sclerometro (Fig.25) è composto da un pistone che viene messo a contatto con la superficie del calcestruzzo da esaminare, da una molla con una certa costante elastica e da una massa anch'essa nota.

Figura 25 – Sclerometro [Fonte: https://www.pce-instruments.com/italiano/strumento-di-misura/misuratore/sclerometro-pce-instruments-sclerometro-pce-ht-225a-det_5837139.htm]

La molla permette alla massa di colpire il pistone, che a sua volta colpisce la superficie del calcestruzzo e rimbalza. Viene misurato il rimbalzo e grazie alle correlazioni tra durezza superficiale e resistenza meccanica, si può valutare la resistenza meccanica a compressione.

La prova viene regolata dalla UNI EN 12504-2, la superficie della prova deve essere liscia e asciutta e lo spessore dell'elemento deve essere maggiore di 150mm inoltre bisogna evitare le zone con

evidenti segni di degrado, in quanto i risultati della prova sono condizionati dalle condizioni della superficie del calcestruzzo, per questo ed altri motivi la prova è ripetuta in almeno 12 punti ed il valore considerato è pari al valor medio di questi.

Lo sclerometro viene posizionato perpendicolarmente alla superficie del calcestruzzo e l'eventuale inclinazione dello strumento rispetto l'orizzontale viene presa in considerazione nelle curve di correlazione (Fig.26).

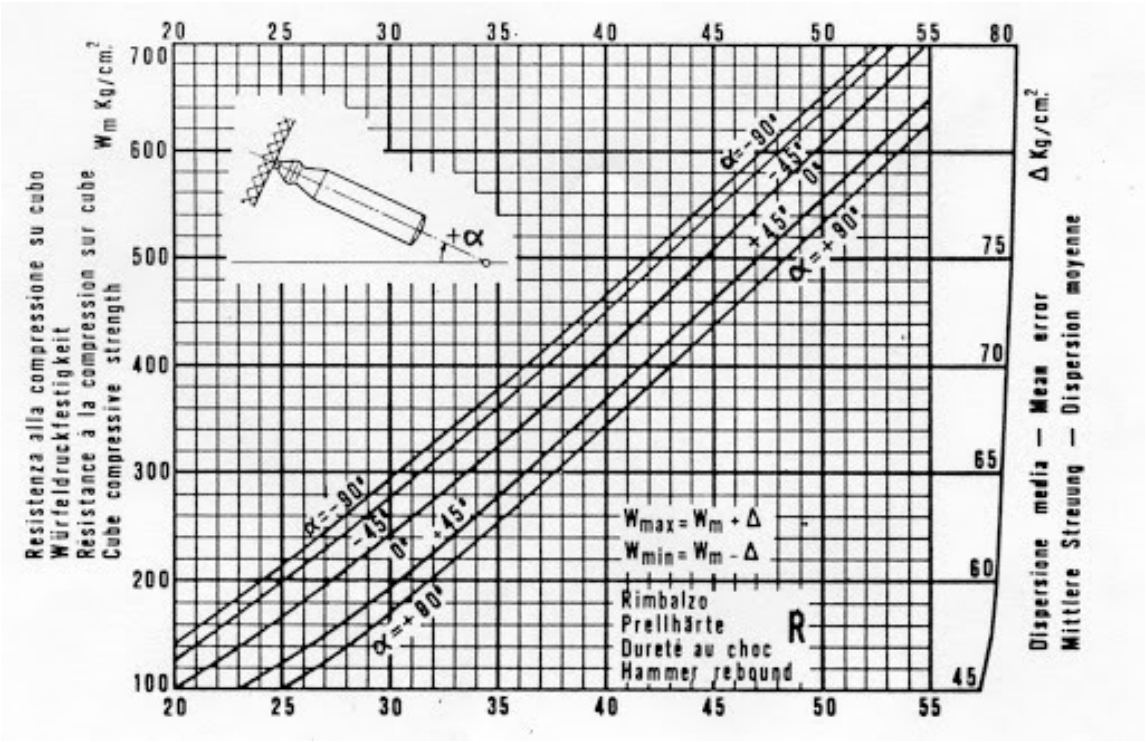


Figura 26 – Curva di correlazione clerometrica [Fonte: http://www.elmeg.org]

2.5.7 Misura con ultrasuoni

Determinando la velocità di propagazione degli ultrasuoni nel materiale è possibile valutare la resistenza a compressione del calcestruzzo, effettuando una prova non distruttiva tramite l'utilizzo di trasduttori. Vengono posti i due trasduttori nelle due estremità opposte della struttura in esame, uno dei due trasduttori emana un impulso ultrasonico è l'altro lo riceve.

Lo strumento (Fig.27) memorizza il tempo che le onde ultrasoniche impiegano ad attraversare la struttura e nota la distanza percorsa, si determina la velocità di propagazione che è correlata al modulo elastico del calcestruzzo. Inoltre questa prova è anche utile a capire se ci sono difetti all'interno della struttura, in quanto la velocità di propagazione varierebbe ed in particolare si ridurrebbe. La prova è regolata dalla normativa UNI EN 12504-4.

Figura 27 – strumenti per la prova ultrasonica [Fonte: Felitti, Matteo, and Lucia Rosaria Mecca. Il Degrado Delle Strutture in Calcestruzzo Armato Diagnosi, Monitoraggio E Soluzioni per Il Recupero. Santarcangelo Di Romagna: Maggioli, 2018.]

2.5.8 Test termografici

Ogni elemento che compone la struttura emette un flusso energetico in funzione della sua temperatura ed emissività. Mediante l'utilizzo di una termocamera è possibile rilevare la temperatura di ogni elemento e l'umidità relativa. L'immagine che restituisce (Fig.28) lo strumento permette di evidenziare diversi aspetti importanti della struttura, come ad esempio:

- Individuazione degli elementi strutturali:
- Se ci sono state modifiche in passato nella struttura
- Individuazione l'umidità di risalita
- Infiltrazioni d'acqua
- Impianti di vario tipo
- Presenze di fessure

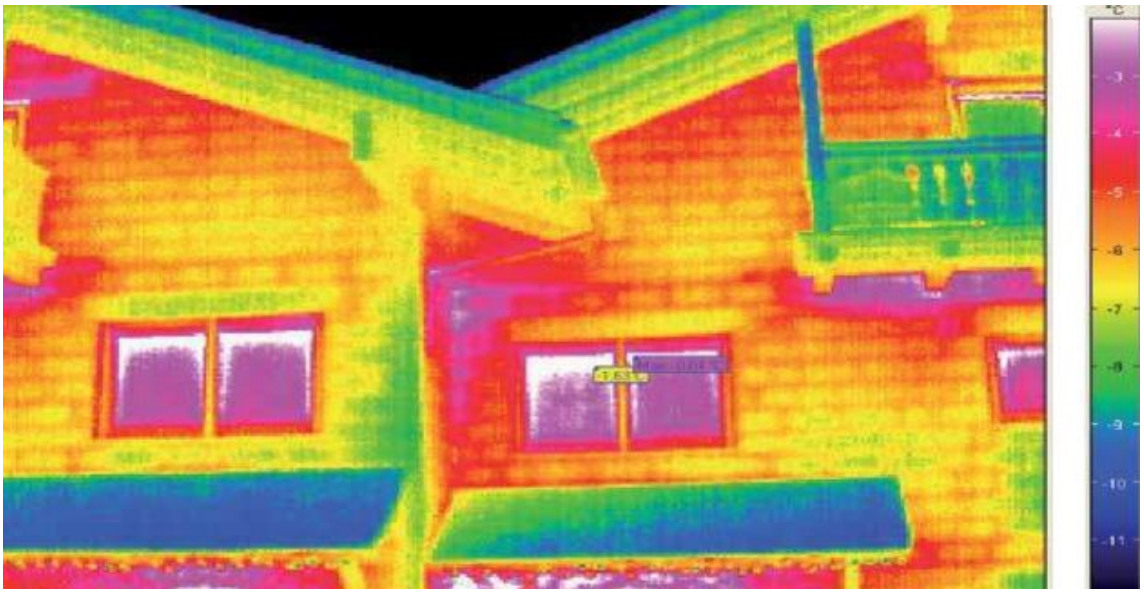


Figura 28 – Esempio di test termografico su una struttura [Fonte: https://www.casicura.com/servizi/termografia/]

Il test termografico è regolato dalla UNI EN 13187 e si basa sulla legge di Stefan-Boltzmann:

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

Dove:

- E è il flusso energetico [W/m^2]
- ε rappresenta l'emissività del corpo ed è un valore adimensionale compreso tra 0 ed 1;
- σ è la costante di Stefan-Boltzmann e vale 5,67·10^8 [W/(m^2·K^4)]
- T è la temperatura assoluta [K] della superficie

2.6 Prove sperimentali per la valutazione dello stato corrosivo di travi alla fine della vita utile

Il fenomeno di degrado più importante per quanto riguarda le strutture in calcestruzzo armato è la corrosione delle barre di armatura. In questo documento si vuole evidenziare lo stato di degrado di un ponte in c.a.p. attraverso l'acquisizione in situ di 3 parametri fondamentali:

- Potenziale di corrosione;
- Velocità di corrosione;
- Resistività del calcestruzzo;

I dati sono stati acquisiti mediante l'utilizzo dello strumento Giatec iCOR®, tale strumento permette di rilevare i 3 parametri contemporaneamente e senza danneggiare la struttura.

La prova sperimentale è stata svolta a TNE Polo tecnologico Mirafiori su 25 travi prefabbricate a doppio T ricavate dalla dismissione del viadotto di C.so Grosseto sito in Torino, alla fine della vita utile.

3 Descrizione della struttura in esame

Il viadotto di Corso Grosseto a Torino (Fig.29) fu costruito nel 1970, era costituito da un doppio impalcato realizzato con travi prefabbricate precompresse in semplice appoggio completato da due travi trasversali intermedie e una soletta in calcestruzzo gettata in opera. Il viadotto aveva un totale di 81 campate semplicemente appoggiate con lunghezza variabile da 16 a 30 m.

Figura 29 – Viadotto di Corso Grosseto. La parte evidenziata rappresenta l'impalcato oggetto di analisi.

L' impalcato in esame era così formato Fig.30: una luce L = 20 m circa e una larghezza trasversale l = 8 m, costituito da:

- 10 travi intermedie prefabbricate a doppio T (Fig.31) con un'altezza H = 90 cm rinforzate da 20 trefoli con un diametro di ½'' e un andamento rettilineo. I trefoli sono così disposti: 17 nella parte inferiore di cui 9 nella prima fila, 8 nella seconda fila e 3 in un'unica fila nella parte superiore della trave.
- 2 travi di bordo a U (Fig.32) prefabbricate di altezza H = 96 cm, rinforzate da 40 trefoli con un diametri di ½'' e un andamento rettilineo. I trefoli sono così disposti: 34 nella parte inferiore di cui 16 nella prima fila, 16 nella seconda fila, 2 nella terza fila e 6 nella parte superiore della trave.
- 1 soletta gettata in opera di 14cm di spessore.
- 2 travi trasversali

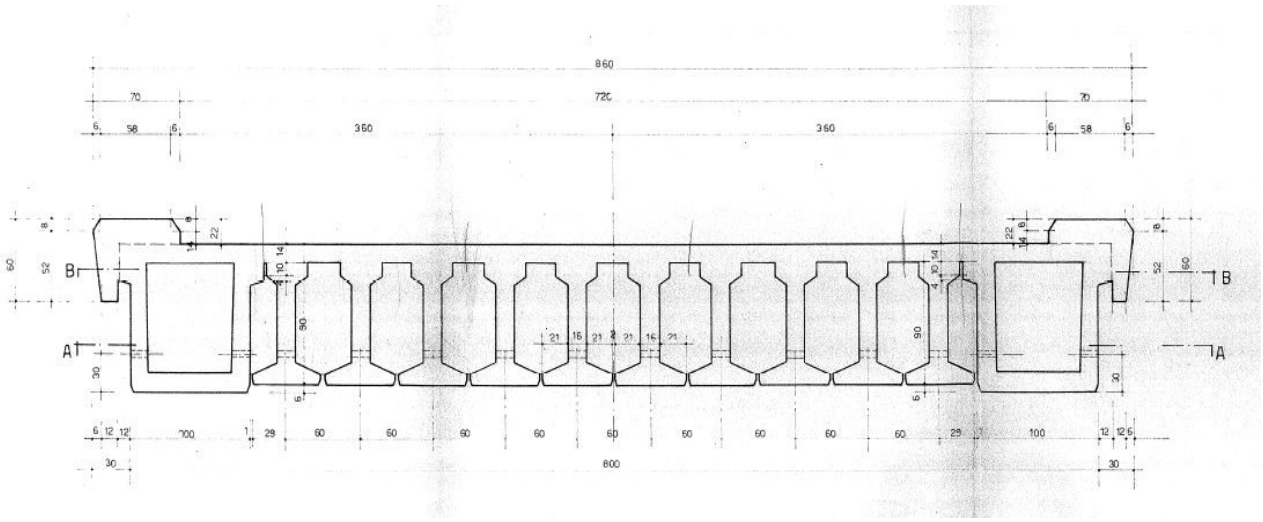


Figura 30 – Sezione trasversale impalcato

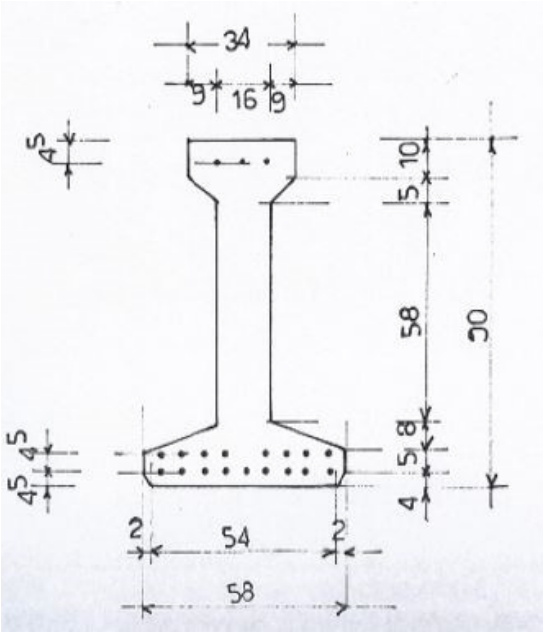


Figura 31 – Sezione di mezzeria della trave intermedia prefabbricata a doppio T

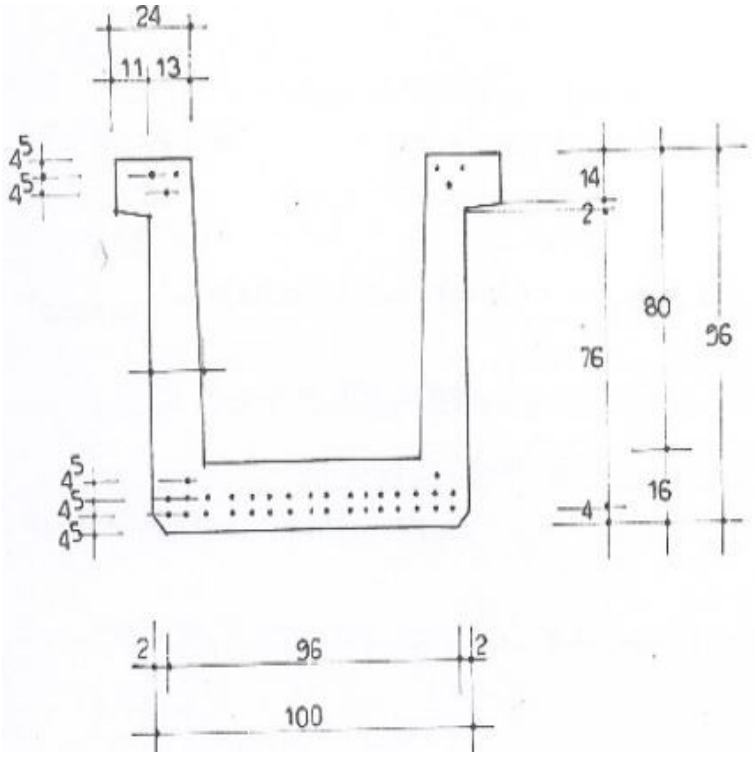


Figura 32 - Sezione di mezzeria della trave di bordo prefabbricata a U

Il viadotto presentando nel corso degli anni evidenti segni di deterioramento, è stato soggetto a numerosi interventi di manutenzioni straordinarie. Durante l'ultima manutenzione nel 2017 è stato constatato che il livello di degrado era troppo elevato e quindi il viadotto doveva essere chiuso al traffico e dismesso. I lavori di dismissione sono iniziati nel 2018.

La demolizione è avvenuta mediante l'utilizzo di pinze idrauliche (Fig.33) ed in buona parte il viadotto è stato tagliato con dei dischi diamantati. Le travi sono state forate superiormente ed inferiormente per consentire alla gru di sollevarle tramite delle funi (Fig.34) e caricarle sui camion.

Figura 33 – Demolizione mediante l'utilizzo di pinze idrauliche

Figura 34 – Processo di dismissione viadotto

Le travi sono state portate a Torino nel TNE Polo tecnologico Mirafiori dove sono state messe singolarmente sopra dei New Jersey in calcestruzzo armato (Fig.35) in modo da mantenere lo stesso schema strutturale operativo.

Figura 35 – Panoramica posizione travi in cantiere

Ad ogni trave è stato affidato un codice in modo da associare la posizione che avevano originariamente (Fig.36) alla nuova posizione in situ (Fig.37).

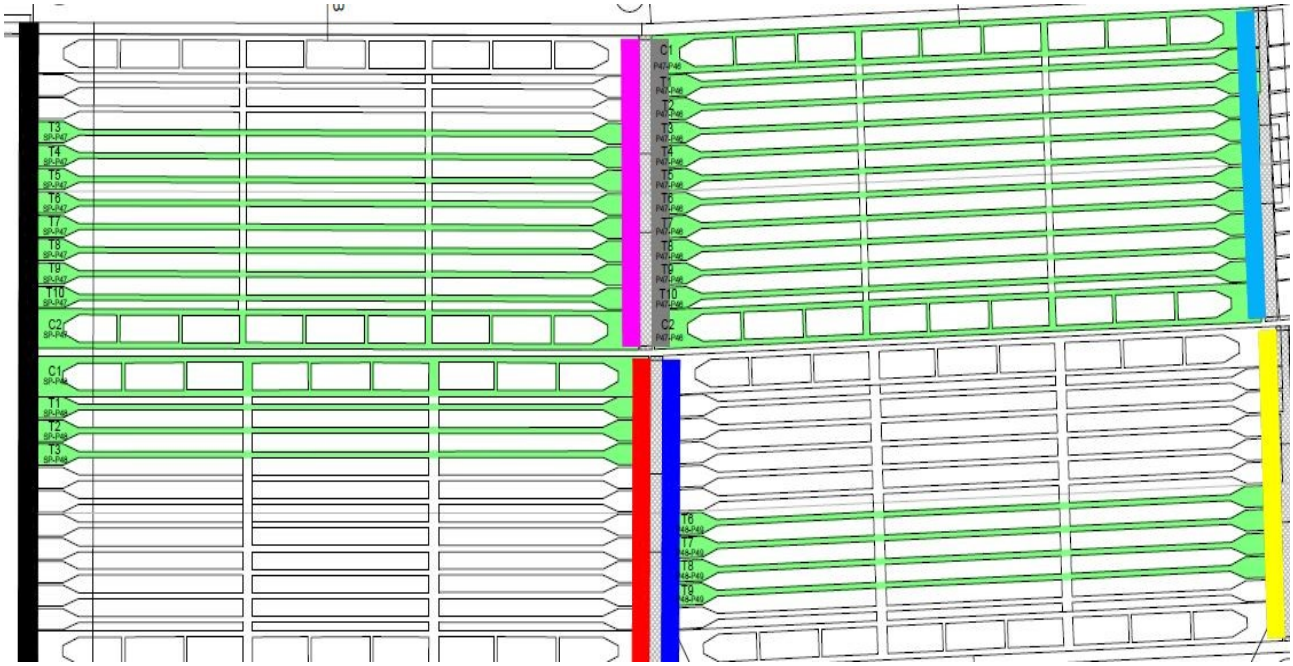


Figura 36 – Posizione delle travi originaria con il relativo codice di identificazione

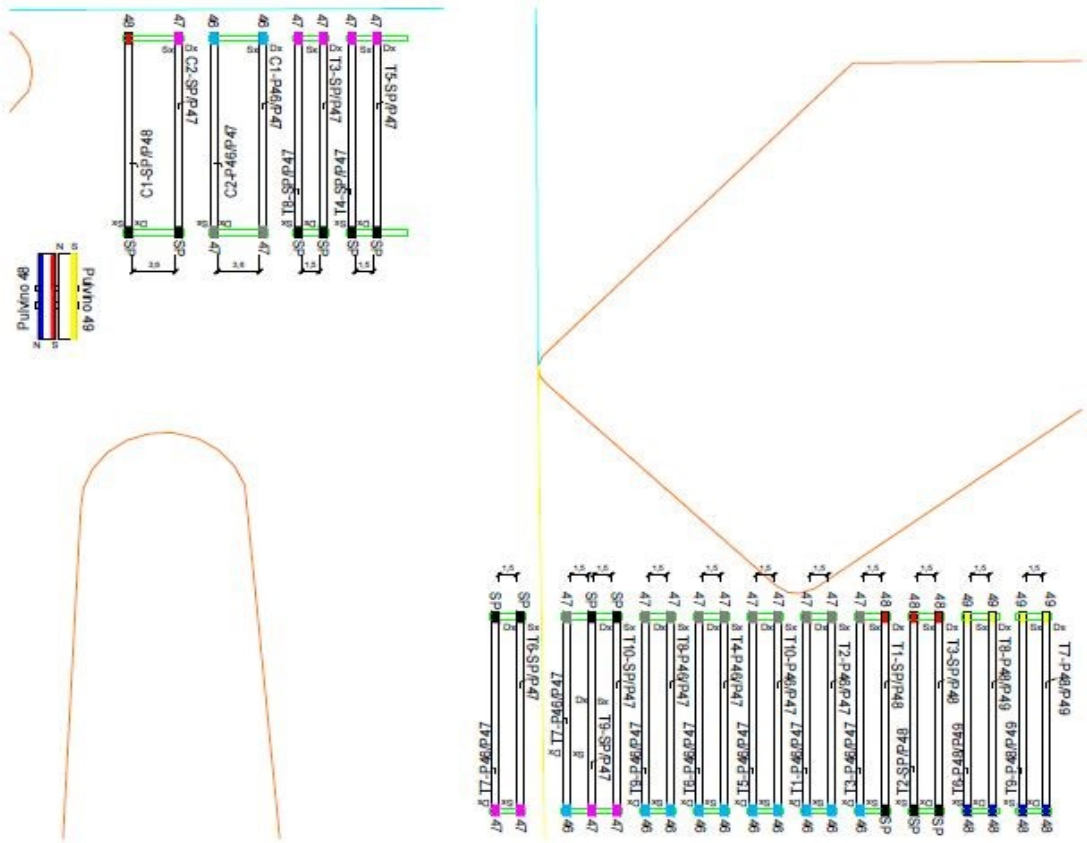


Figura 37 – Posizione delle travi in situ con il relativo codice di identificazione

3.1 Descrizione della strumentazione utilizzata

Giatec iCOR® è un dispositivo (Fig.38) che permette di effettuare delle prove non distruttive per valutare il degrado in una struttura, sia in laboratorio che sul campo.

Figura 38 – Dispositivo di misura Giatec iCOR® [Fonte: Giatec-iCOR-UserManual]

Il dispositivo ha dei sensori ad alta precisione, utili a valutare:

- Temperatura
- Umidità relativa
- Potenziale di corrosione
- Resistività del calcestruzzo
- Velocità di corrosione

La velocità di corrosione dell'armatura, viene misurata mettendo a contatto i quattro elettrodi con la superficie del calcestruzzo. Lo strumento genera una corrente alternata costante tra gli elettrodi esterni e misura la tensione tra quelli interni.

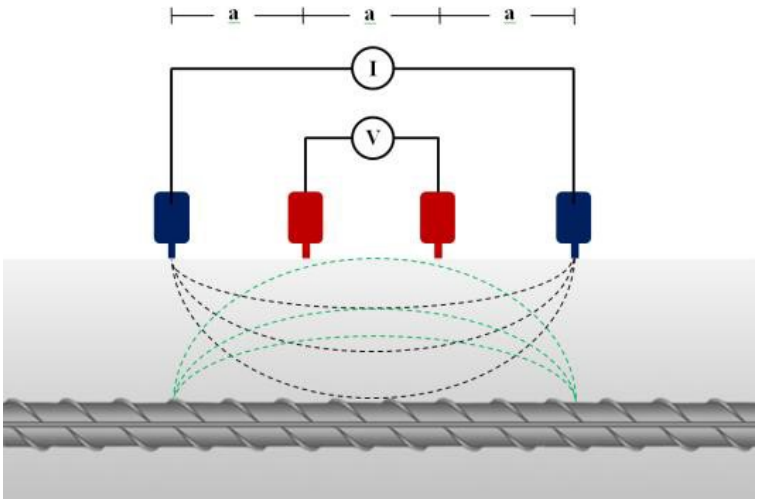


Figura 39 - Rilevamento della corrosione delle armature all'interno del calcestruzzo. [Fonte: Giatec-iCOR-UserManual]

Lo strumento utilizza un concetto base per rilevare la velocità di corrosione, senza che esso venga connesso direttamente con l'armatura, ovvero la risposta in tensione di un'armatura che non si corrode tende ad aumentare in una zona a bassa frequenza (Fig.40) e varia pochissimo per un'armatura che si corrode.

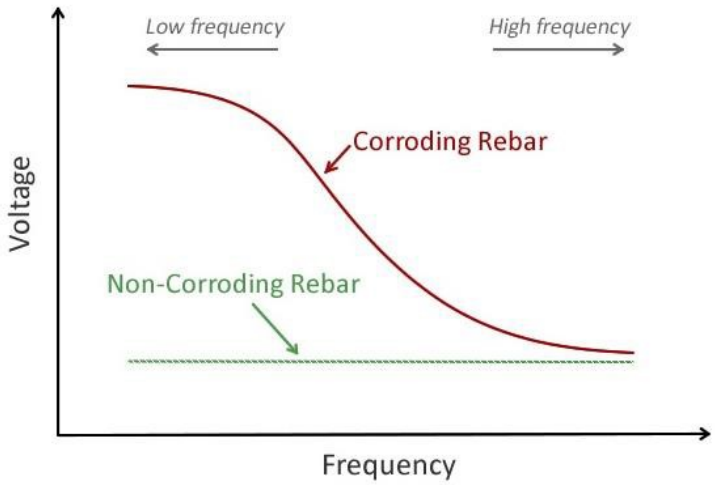


Figura 40 – Esempio di risposta di una barra che si corrode e di una barra che non si corrode. [Fonte: Giatec-iCOR-UserManual]

La risposta di impedenza a bassa frequenza è correlata alla corrosione dell'armatura, il dispositivo Giatec iCOR® utilizza una tensione a gradino DC/AC per un determinato tempo e registra velocemente ed in simultanea la risposta. In questo modo riesce a determinare la risposta di impedenza a bassa frequenza e quindi la velocità di corrosione dell'armatura all'interno del calcestruzzo. "Questa tecnologia brevettata è stata sviluppata da Giatec Scientific Inc. ed è chiamata Connectionless Electrical Pulse Response Analysis (CEPRA)." [21]

Giatec iCOR® utilizza un complesso circuito elettrico (Fig.41) ed un algoritmo che gli permettono di capire le proprietà del calcestruzzo, dell'acciaio e di analizzarne la resistenza di polarizzazione, la resistività elettrica e il potenziale di semicella del rinforzo incorporato.

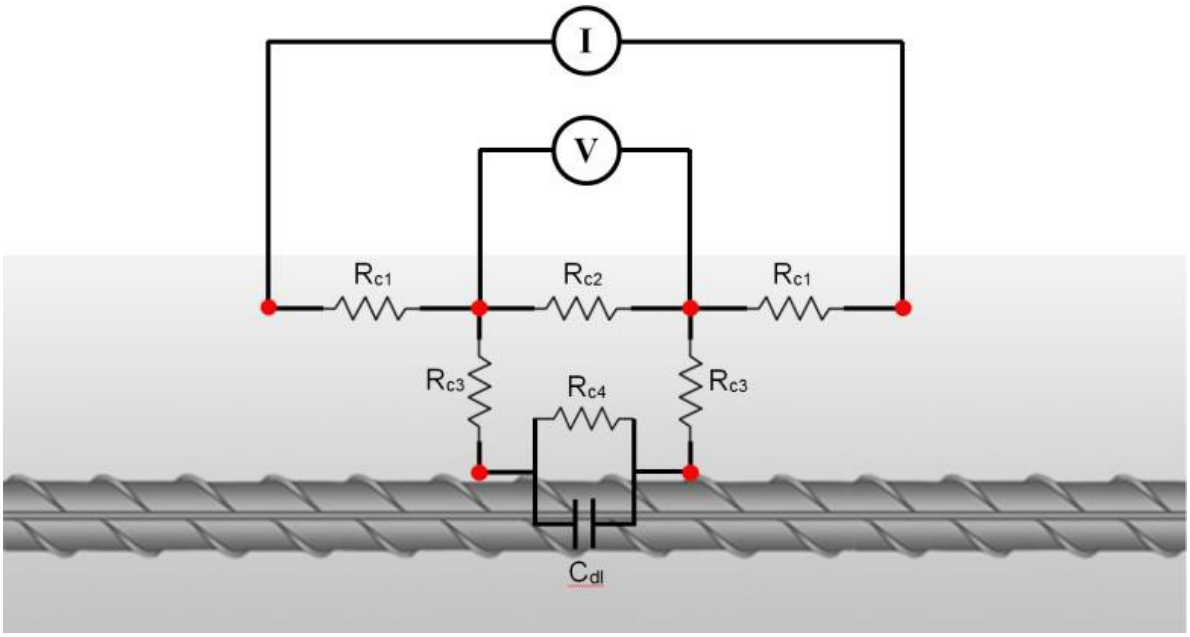


Figura 41 – Circuito elettrico utilizzato dal dispositivo [Fonte: Giatec-iCOR-UserManual]

La resistenza di polarizzazione permette di calcolare la velocità di corrosione, in quanto i due parametri sono correlati dalle seguenti equazioni [21]:

$$R_p = A_p \cdot R_{c4}$$

$$I_{cor} = \frac{B}{Rp}$$

Indicando con:

- B una costante determinata sperimentalmente
- A_p L'area polarizzata dell'armatura
- R_{c4} la resistenza al trasferimento di carica dell'armatura (Fig.41)
- R_p la resistenza di polarizzazione
- I la velocità di corrosione

La resistività del calcestruzzo può essere misurata sia in presenza di barre di armatura che in loro assenza. Nel caso in cui non siano presenti armature, la resistività viene misurata utilizzando il metodo Wenner Array.

Se invece è presente l'armatura nel punto in cui si svolge la prova, la resistività elettrica viene misurata da R_{c2}, R_{c3} e R_{c4}, utilizzando la seguente equazione [21]:

$$\rho = 2\pi a \times R$$

Indicando con:

- a una costante che dipende dalla geometria degli elettrodi
- R la resistenza equivalente del calcestruzzo che viene calcolata

Il dispositivo utilizza un elettrodo Ag / AgCl per misurare la corrosione a semicella, che indica il **potenziale di corrosione** delle armature. Mediante l'utilizzo del software iCOR®, converte i risultati in mV / CSE cioè l'elettrodo Cu / CuSO4 (CSE) secondo ASTM C876. Giatec iCOR® consente di generare una contour map utile a determinare e valutare lo stato di corrosione delle armature.

Il potenziale di corrosione è correlato alla probabilità di corrosione come in Fig.42.

Measured Potential (mV/CSE*)	Probability of Steel Corrosion Activity
> -200	Less than 10%
-200 to -350	Uncertain
< -350	More than 90%

* CSE= Copper Sulfate Electrode

Figura 42 - Relazione tra i valori del potenziale e la probabilità di corrosione (adattato da ASTM C876) [Fonte: Giatec-iCOR-UserManual]

Nella Fig. 43 si riportano i range di misura del potenziale a semicella in differenti condizioni di prova.

Condition	Potential Values (mV/CSE*)		
Humid, chloride free concrete	-200	to	+100
Wet, chloride contaminated concrete	-600	to	-400
Water saturated concrete without oxygen	-1000	to	-900
Humid, carbonated concrete	-400	to	+100
Dry, carbonated concrete	0	to	+200
Dry concrete	0	to	+200

* CSE= Copper Sulfate Electrode

Figura 43 - Intervalli tipici del potenziale a semicella dell'armatura nel calcestruzzo (adattato da RILEM TC-154, 2003) [Fonte: Giatec-iCOR-UserManual]

Resistivity (Ω.m)	Classification
>200	Very High
100-200	High
50-100	Moderate
<50	Low

Figura 44- classificazione in base ai valori di resistività

Corrosion Rate		
(μA/cm²)	(μm/year)	Classification
< 1	< 10	Passive/Low
1 – 3	10 - 30	Moderate
3- 10	30 - 100	High
> 10	> 100	Severe

Figura 45 -classificazione in base ai valori di velocità di corrosione

3.2 Descrizione prova

La prova può essere divisa principalmente in 3 fasi:

- Preliminare
- Acquisizione dei dati
- Analisi dei dati acquisiti (Capitolo 4)

La fase preliminare consiste in tutte quelle procedure ed accorgimenti che bisogna fare prima di iniziare con l'acquisizione dei dati.

Per prima cosa, tramite l'utilizzo del pacometro, devono essere individuate e marcate sulla superficie del calcestruzzo l'esatta posizione delle barre di armatura ordinaria ed i trefoli, che si trovano all'interno delle travi in esame.

Successivamente, nell'estremità della trave tramite l'utilizzo di un martello si scoprono i trefoli di alcuni centimetri e con la lima viene rimosso lo strato di corrosione che si era formato in modo tale che l'acciaio presente sotto tale strato sia ben visibile. Questo passaggio permette, mediante l'ausilio di un voltmetro (Fig.46), di verificare se le armature sono connesse tra di loro e quindi che ci sia continuità.

Figura 46 – Voltmetro

Una volta verificata la continuità delle armature si sceglie un trefolo, che verrà connesso attraverso dei cavi allo strumento Giatec iCOR®, nei passaggi successivi, in tal modo durante la prova sarà possibile misurare il potenziale di corrosione.

Successivamente si prepara lo strumento Giatec iCOR® seguendo alcuni passaggi.

Si accende lo strumento e si connette tramite Bluetooth all'unità di registrazione dei dati, ovvero il tablet, dove è preinstallata un'applicazione (Fig.47) che permette di utilizzare il dispositivo.

Figura 47 – Icona applicazione iCOR [Fonte: Giatec-iCOR-UserManual]

Prima di iniziare le misure è necessario verificare l'accuratezza dello strumento tramite l'utilizzo del kit di verifica, uno per la misura del potenziale di corrosione a semicella e un altro per la velocità di corrosione e la resistività elettrica lungo x e lungo y (Fig.48).

Figura 48 – a sinistra il kit per verifica della misura del potenziale di corrosione a semicella; a destra il kit per la verifica di velocità di corrosione e resistività elettrica. [Fonte: Giatec-iCOR-UserManual]

A questo punto superate le 3 verifiche si procede tramite l'applicazione, alla creazione di un nuovo progetto. Si definisce quindi il nome del progetto e si seleziona la tipologia di misurazione che si vuole effettuare, così come descritto nella tabella del manuale Giatec iCOR® (Fig.49).

iCOR® User Manual

Measurement Type	Acronym	Measurement Information
Corrosion rate (automatically includes concrete resistivity)	CR	- Measurement of corrosion rate and concrete resistivity; the effect of the rebar is excluded in the resistivity measurements. (p. 8 of manual) - Measurements can be performed without connection to the steel reinforcement.
Corrosion rate and half-cell potential	CR+HC	-Same measurements as CR, in addition the half-cell measurement is also taken. -This measurement requires connection to the reinforcement.
Half-cell potential	HC	-Only the half-cell measurement is taken. -The measurement will be set to 3 seconds by default. -Connection to the reinforcement is required.
Concrete resistivity	R	- Only the surface concrete resistivity is measured using the 4 probe Wenner Array method. For this measurement, the device shouldn't be placed on top of the rebar, as the rebar can affect the reading. -The measurement will be set to 3 seconds by default. -No connection to the reinforcement required.
Concrete resistivity and half-cell potential	R+HC	-Same measurement as R, in addition the half-cell measurement is also taken. - This measurement requires connection to the reinforcement.

© Giatec Scientific Inc.

Figura 49 – Tipologie di misura dello strumento [Fonte: Giatec-iCOR-UserManual]

Lo strumento è in grado di misurare contemporaneamente la velocità di corrosione, la resistività del calcestruzzo e il potenziale di corrosione. Dopo aver selezionato la tipologia e successivamente le unità di misura si passa alla creazione della griglia (Fig.50) e si definiscono i diametri delle barre di armatura lungo x e y. Per poterla definire bisogna quindi conoscere il numero di barre presenti all'interno dell'elemento e la spaziatura tra esse in x e y, ecco perché inizialmente è importante individuare l'esatta posizione delle barre di armature mediante l'utilizzo del pacometro.

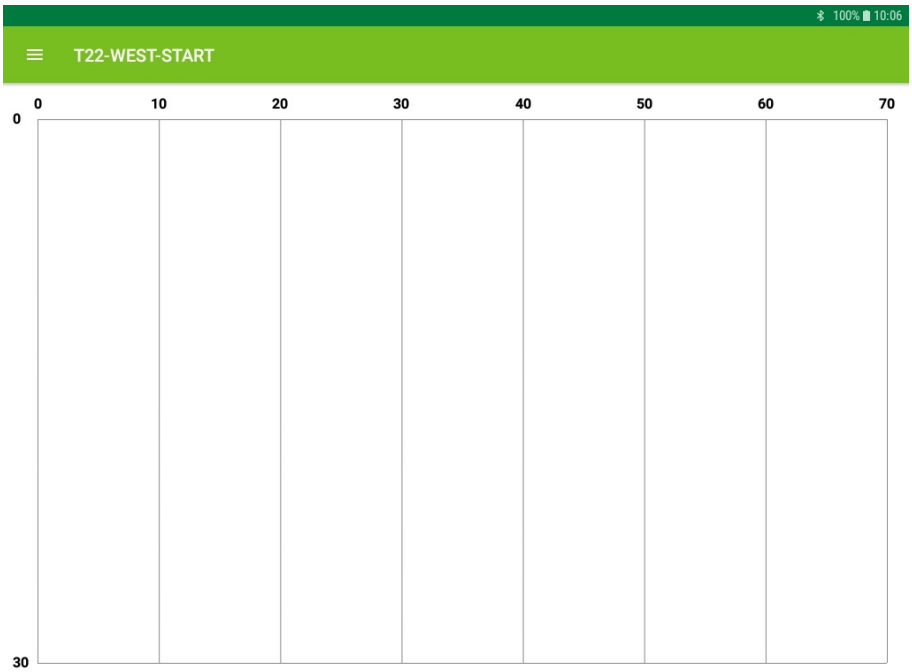


Figura 50 – Esempio griglia

Si procede alla preparazione dello strumento Giatec iCOR®. Nella parte inferiore (Fig.51) sono presenti dei "porta spugne", deve essere inserito all'interno di essi il gel conduttivo, ma solamente in quelli utili per misurare la velocità di corrosione e la resistività del calcestruzzo. Successivamente si inseriscono le spugne, che devono essere umide, compresa quella per misurare il potenziale di corrosione. Lo strumento viene collegato all'armatura attraverso il cavo ed un "Clip di prova a coccodrillo".

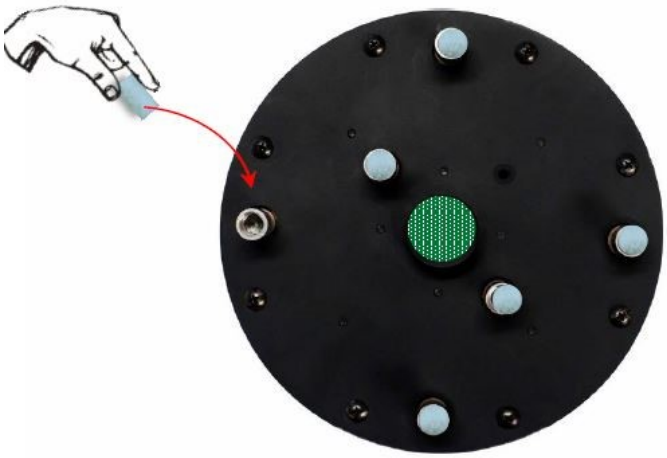


Figura 51 – Preparazione degli elettrodi [Fonte: Giatec-iCOR-UserManual]

Prima di effettuare i test, per evitare che le misure prese dallo strumento vengano influenzate a causa di una superficie troppo asciutta, bisogna inumidire la superficie della struttura in esame, Tuttavia, durante il test non dovrebbe essere presente acqua in eccesso sulla superficie. Inoltre bisogna assicurarsi che non siano presenti rivestimenti isolanti sia sulle barre di armature che sulla superficie del calcestruzzo.

Da questo momento in poi è possibile iniziare la fase di acquisizione dei dati.

Si seleziona un punto nella griglia del tablet e si porta lo strumento Giatec iCOR® nel punto della griglia corrispondente sulla superficie del calcestruzzo in modo che lo strumento sia allineato alla direzione della barra di armatura che si vuole misurare (Fig.52).

Figura 52 –Esempio posizionamento dello strumento [Fonte: Foto scattata in cantiere durante lo svolgimento della tesi sperimentale]

Dall'applicazione si impostano i parametri per il test che sono:

- Direzione della misura x o y
- Durata del test
- Spessore del copriferro

Dal tablet viene lanciato il comando misura che permette allo strumento di effettuare il test, le spugne dello strumento devono rimanere per tutto il tempo (preimpostato) a contatto con la superficie del calcestruzzo.

Dopo che le misurazioni sono state prese ed analizzate i dati verranno inoltrati al tablet, che restituirà un grafico (Fig.53). Si ripete la fase di acquisizione dei dati per ogni punto della griglia ed

una volta terminata questa fase, è possibile generare una contour map della struttura per ogni tipologia di misura.

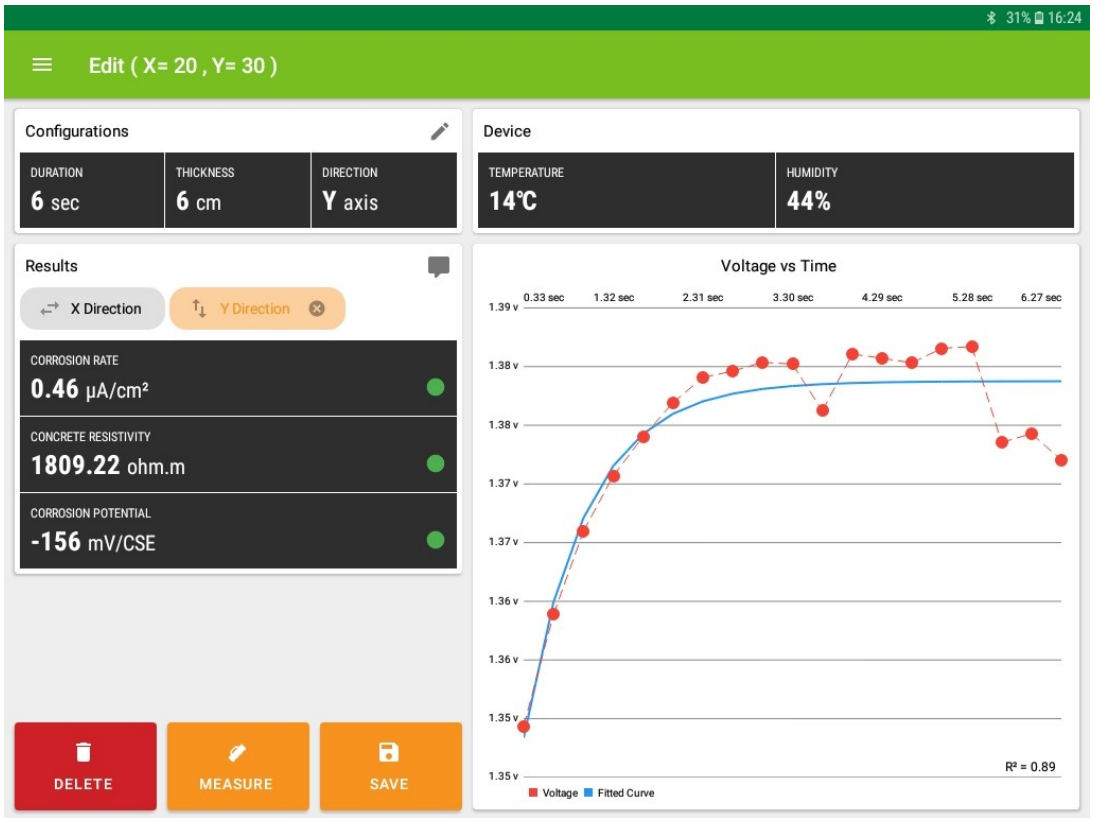


Figura 53 – Esempio grafico test di misura

4 Risultati

In questo capitolo sono riportati e analizzati i dati acquisiti relativi alle travi precompresse a doppia T facente parte del viadotto di Corso Grosseto a Torino oggetto di studio di questa tesi. Durante lo svolgimento della tesi sono state analizzate in tutto 25 travi precompresse a doppia T e si riportano di seguito, a titolo di esempio, l'analisi relativa a 4 di esse, appartenenti a posizioni significative nell'impalcato e cioè le zone meno esposte (centrali) e quelle maggiormente esposte (esterne) in modo tale da ottenere una correlazione tra le misurazioni effettuate e la reale condizione di esposizione al degrado. Per la rimanente parte dei dati si rimanda agli allegati della tesi.

Per quanto riguarda la posizione delle travi originaria con il relativo codice di identificazione e per la posizione delle travi in situ con il relativo codice di identificazione si faccia riferimento alle figure 36 e 37 del capitolo 3 paragrafo 3.1.

La dicitura "START" all'interno del nome del progetto serve per indicare la parte iniziale della trave a seconda del sistema di riferimento locale utilizzato in situ (uguale per ogni trave). Si indica quindi con "START" l'immagine a sinistra di ogni vista, indipendentemente che essa sia vista est o ovest e con "END" l'immagine a destra di ogni vista. Il sistema di riferimento locale utilizzato è descritto in Fig.(54):

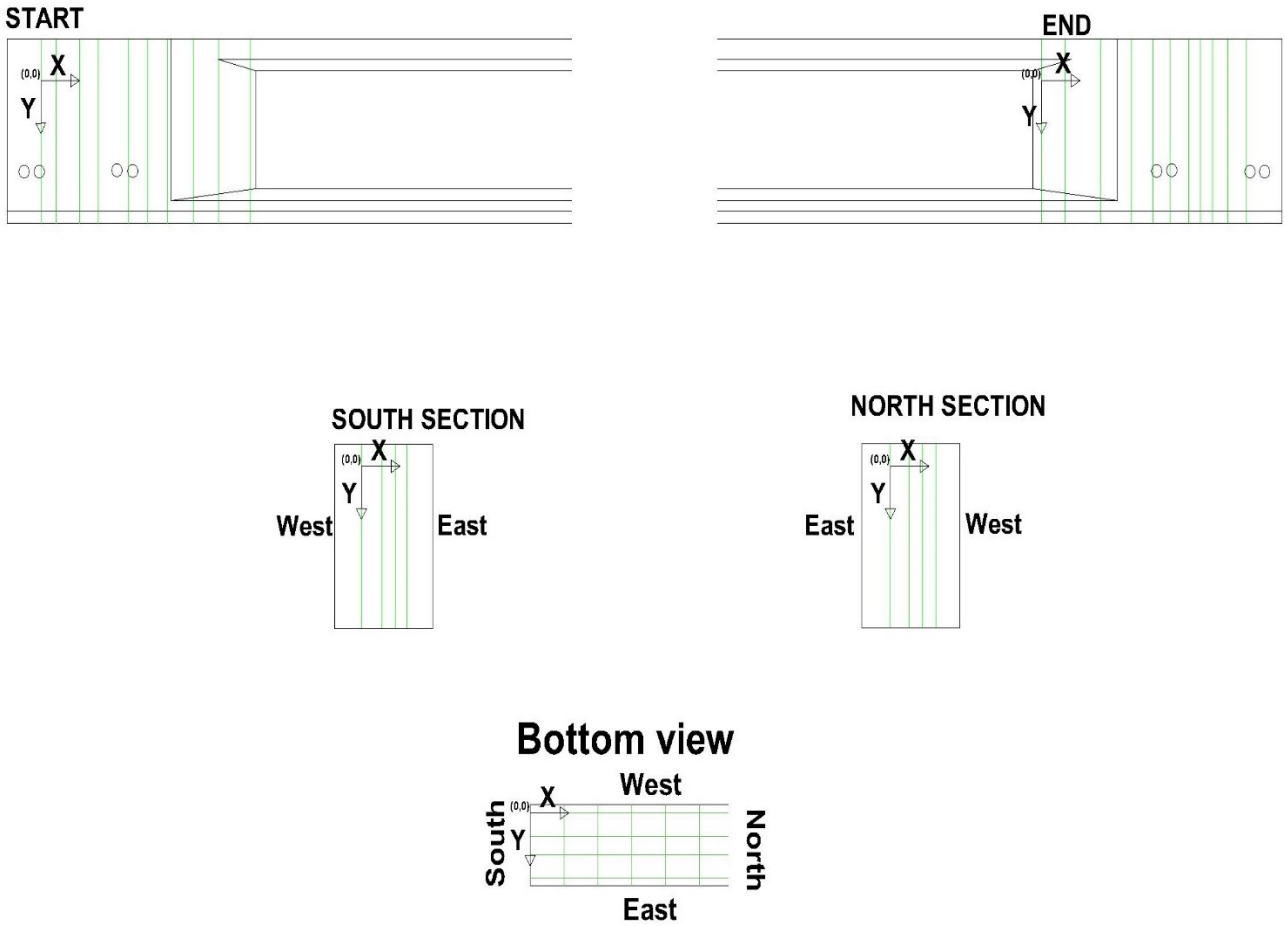


Figura 54 –Sistema di riferimento

In alcuni punti non è stato possibile effettuare le misurazioni a cause del copriferro elevato o la presenza di fessure poiché non consentono la corretta realizzazione del circuito elettrico.

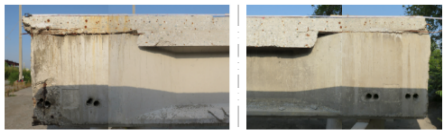
Vengono riportati nella prima tabella i dati relativi alla fase precedente alla misurazione, dove vengono definiti: i parametri, il nome del progetto e le unità di misura. Si noti inoltre che lo strumento crea una griglia a distanza costante tra i punti, considera quindi una distanza tra le barre di armatura uguale, nella seconda tabella tali valori sono stati modificati con quelli reali.

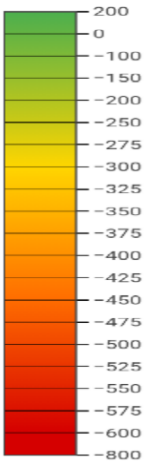
Nella seconda tabella vengono riportati invece: la distanza tra i punti dove sono state effettuate realmente le misure, i valori relativi alle tre misure in esame, la durata della prova, il copriferro relativo ad ogni punto, la temperatura e l'umidità.

ID Beam: BEAM T1-P47/P46

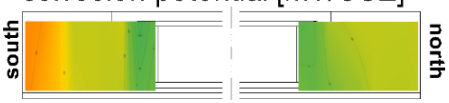
South view

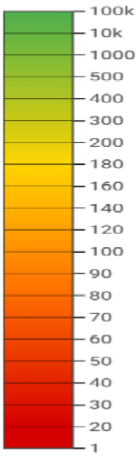
East view



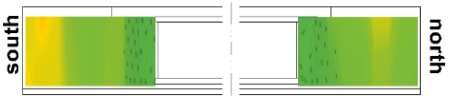


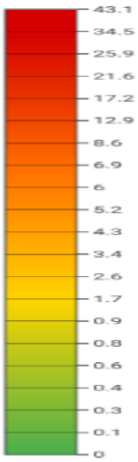
corrosion potential [mV/CSE]





concrete resistivity [ohm.m]





corrosion rate [μA/cm²]

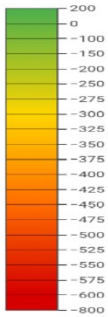
Project Name:	T1-P47/P46-EAST-START
Temperature Correction:	On
X Length:	80
Y Length:	30
X Spacing:	10
Y Spacing:	30
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	C
Corrosion Rate: Unit:	ÂµA/cmÂ²
Concrete Resistivity:	ohm.m
Corrosion Potential Unit:	mV/CSE
Rebar Diameter(x)[mm]:	8
Rebar Diameter(y)[mm]:	8
Duration Unit:	seconds
Thickness Unit:	centimeter
Current Unit:	A
Voltage Unit:	V
Ap Unit:	cmÂ²
Rp Unit:	ohm.cmÂ²

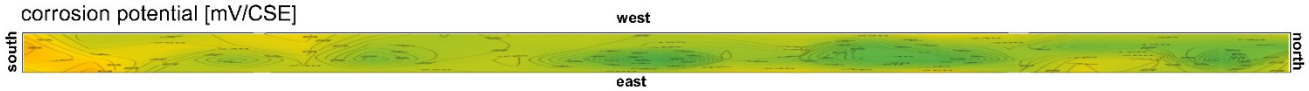
X	Y	Corrosion Potential	Corrosion Rate(Y)	Concrete Resist.(Y)	Duration Y	Cover Thickness(Y)	Temp	Humidity
0	0	-409	1.07	229	6	5	10	46%
0	30	-416	3.36	162	6	5	10	46%
13	0	-400	9.02	156	6	5	10	47%
13	30	-366	1.30	230	6	5	10	50%
24	0	-335	1.89	207	6	5	10	50%
24	30	-330	0.83	227	6	5	10	46%
37	0	-234	0.21	931	6	5	10	45%
37	30	-254	0.83	626	6	5	10	47%
50	0	-239	0.18	1463	6	5	10	49%
50	30	-242	0.03	1224	6	5	10	47%
62	0	-231	0.75	886	6	5	10	46%
62	30	-227	0.15	627	6	5	10	45%
73	0	-253	0.67	715	6	5	10	43%
73	30	-216	0.07	992	6	5	10	44%
103	0	245	0.01	46837	10	3	11	43%
103	30	32	0.01	42348	10	3	11	44%
120	0	6	0.01	27302	6	3	11	44%
120	30	-35	0.01	23703	6	3	11	46%

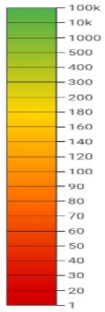
Project Name:	T1-P47/P46-EAST-END
Temperature Correction:	On
X Length:	80
Y Length:	30
X Spacing:	10
Y Spacing:	30
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	C
Corrosion Rate: Unit:	ÂµA/cmÂ²
Concrete Resistivity:	ohm.m
Corrosion Potential Unit:	mV/CSE
Rebar Diameter(x)[mm]:	8
Rebar Diameter(y)[mm]:	8
Duration Unit:	seconds
Thickness Unit:	centimeter

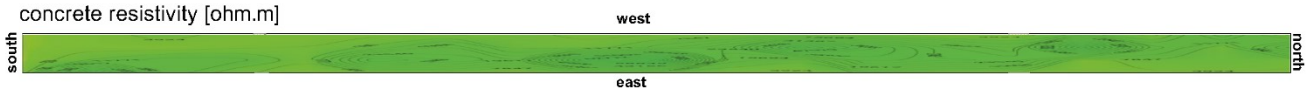
X	Y	Corrosion Potential	Corrosion Rate(Y)	Concrete Resist.(Y)	Duration Y	Cover Thickness(Y)	Temp	Humidity
0	0	95	0.01	53307	10	2	13	38%
0	30	-63	0.02	18074	10	2	13	38%
19	0	8	0.08	39135	6	3	13	40%
19	30	-5	0.00	49478	6	3	13	40%
49	0	-182	0.93	2619	6	5	12	36%
49	30	-85	0.01	17163	6	5	12	38%
64	0	-203	3.43	1231	6	4	12	40%
64	30	-134	0.38	2465	6	4	12	43%
74	0	-235	0.25	816	6	4	12	39%
74	30	-158	0.11	2679	6	4	12	38%
87	0	-230	7.26	294	6	4	12	37%
87	30	-218	3.16	625	10	4	11	53%
97	0	-225	3.95	293	10	4	12	48%
97	30	-214	8.83	689	10	4	12	42%
109	0	-223	0.84	885	6	4	12	42%
109	30	-211	0.26	1541	6	4	12	41%
123	0	-239	1.18	821	6	4	12	44%
123	30	-219	0.06	2235	6	4	12	40%

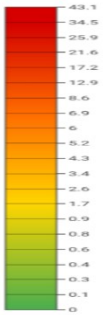
ID Beam: BEAM T1-P47/P46
Bottom view

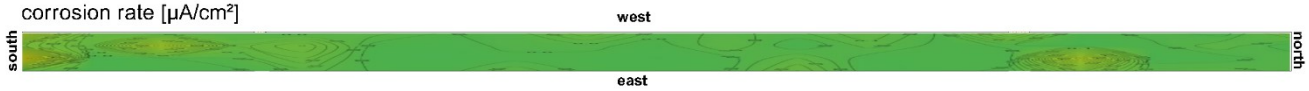












Project Name:	T1-P47/P46-BOTTOM
Temperature Correction:	On
X Length:	1800
Y Length:	30
X Spacing:	100
Y Spacing:	10
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	C
Corrosion Rate: Unit:	ÂµA/cmÂ²
Concrete Resistivity:	ohm.m
Corrosion Potential Unit:	mV/CSE
Rebar Diameter(x)[mm]:	15
Rebar Diameter(y)[mm]:	15
Duration Unit:	seconds
Thickness Unit:	centimeter

X	Y	Corrosion Potential	Corrosion Rate(Y)	Concrete Resist.(Y)	Duration Y	Cover Thickness(Y)	Temp	Humidity
0	0	-319	0.51	584	6	4	9	85%
0	10	-363	0.20	643	6	4	9	85%
0	20	-336	0.82	415	6	4	9	86%
0	30	-274	0.06	1167	6	4	9	85%
80	30	-352	0.00	53829	6	4	9	83%
80	20	-313	0.01	8477	6	4	9	83%
80	10	-253	0.09	1628	6	4	9	83%
80	0	-221	0.11	1538	6	4	9	83%
180	0	-223	0.02	6207	6	4	9	83%
180	10	-280	0.48	863	6	4	9	84%
180	20	-257	0.02	13804	6	4	9	84%
180	30	-204	0.01	15387	6	4	9	84%
280	0	-274	0.04	1916	6	4	9	84%
280	10	-255	0.09	3033	6	4	9	84%
280	20	-137	0.04	13337	6	4	9	84%
280	30	-246	0.01	4874	6	4	9	84%
380	0	-287	0.03	1949	6	4	9	66%
380	10	-276	0.15	4080	6	4	9	67%
380	20	-253	0.11	4750	6	4	9	67%
380	30	-227	0.05	1868	6	4	9	63%
480	0	-230	0.05	2523	6	4	9	56%
480	10	-164	0.01	9222	6	4	10	58%
480	20	-99	0.00	35095	6	4	10	59%
480	30	-246	0.02	3080	6	4	10	59%

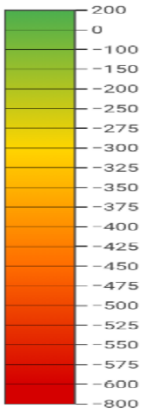
580	0	-177	0.02	2417	6	4	10	56%
580	10	-190	0.00	19378	6	4	10	57%
580	20	-199	0.00	26895	6	4	10	56%
580	30	-226	0.01	5480	6	4	10	56%
680	0	-225	0.03	5015	6	4	10	55%
680	10	-201	0.03	6396	6	4	10	56%
680	20	-229	0.01	20079	6	4	10	54%
680	30	-212	0.06	954	6	4	10	57%
780	0	-220	0.11	2776	10	4	10	56%
780	10	-204	0.03	5917	6	4	10	56%
780	20	-87	0.01	68912	6	4	10	57%
780	30	-220	0.01	5213	6	4	10	57%
880	30	-252	0.02	2069	6	4	10	55%
880	20	159	0.00	80003	10	4	10	53%
880	10	-170	0.01	13421	6	4	10	54%
880	0	-197	0.04	3802	6	4	10	54%
980	0	-226	0.05	3621	6	4	10	53%
980	10	-159	0.06	24753	6	4	10	54%
980	20	-162	0.01	13843	6	4	10	54%
980	30	-270	0.02	3657	6	4	10	56%
1080	0	-236	0.04	2921	6	4	10	57%
1080	10	-200	0.00	62115	6	4	10	57%
1080	20	-113	0.06	9235	6	4	11	56%
1080	30	-298	0.11	2710	6	4	11	57%
1180	0	-246	0.09	3815	6	4	11	58%
1180	10	22	0.05	40229	6	4	11	57%
1180	20	45	0.01	33407	6	4	11	57%
1180	30	-265	0.00	9472	6	4	11	59%
1280	0	-299	0.02	1715	6	4	11	61%
1280	10	-109	0.01	24303	6	4	11	63%
1280	20	77	0.01	28155	6	4	11	60%
1280	30	-330	0.01	3986	10	4	11	60%
1380	30	-189	0.03	3060	6	4	11	60%
1380	20	-134	0.01	26763	6	4	11	59%
1380	10	-167	0.03	16049	6	4	11	57%
1380	0	-269	0.17	717	6	4	11	56%
1480	0	-209	0.01	9581	6	4	10	63%
1480	10	-67	0.00	62119	6	4	10	60%
1480	20	-253	0.50	2089	6	4	10	61%
1480	30	-277	0.20	1643	6	4	10	63%
1580	0	-211	0.03	2163	10	4	10	57%
1580	10	-100	0.01	17630	6	4	10	55%
1580	20	-249	0.00	7365	6	4	10	56%
1580	30	-208	0.05	2838	6	4	10	55%
1680	30	-192	0.06	3433	6	4	10	53%

1680	20	55	0.01	7619	6	4	10	53%
1680	10	-71	0.06	5285	6	4	10	62%
1680	0	-186	0.01	22806	6	4	10	54%
1740	0	-271	0.11	425	6	4	10	56%
1740	10	-32	0.00	29835	6	4	10	61%
1740	20	-254	0.04	5782	6	4	10	58%
1740	30	-255	0.03	2965	6	4	10	60%

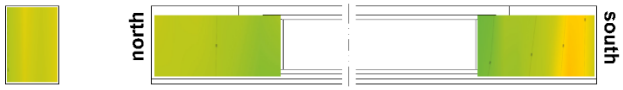
ID Beam: BEAM T1-P47/P46

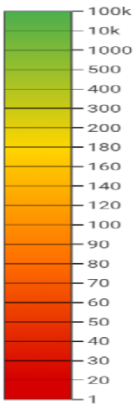
North view

West view

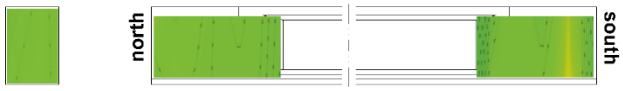


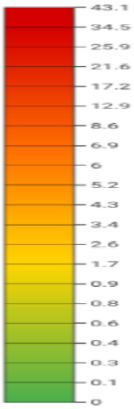
corrosion potential [mV/CSE]



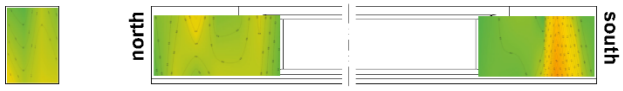


concrete resistivity [ohm.m]





corrosion rate [μA/cm²]



Project Name:	T1-P47/P46-NORTH-SECTION
Temperature Correction:	On
X Length:	30
Y Length:	30
X Spacing:	10
Y Spacing:	30
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	C
Corrosion Rate: Unit:	ÂµA/cmÂ²
Concrete Resistivity:	ohm.m
Corrosion Potential Unit:	mV/CSE
Rebar Diameter(x)[mm]:	8
Rebar Diameter(y)[mm]:	8
Duration Unit:	seconds
Thickness Unit:	centimeter

X	Y	Corrosion Potential	Corrosion Rate(Y)	Concrete Resist.(Y)	Duration Y	Cover Thickness(Y)	Temp	Humidity
0	0	-199	0.19	1953	6	3	12	39%
0	30	-195	1.06	1729	6	3	11	42%
8	0	-272	0.04	1717	6	4	11	37%
8	30	-263	0.62	1101	6	4	11	38%
16	0	-244	0.65	1086	6	4	11	39%
16	30	-236	0.83	1060	6	4	11	39%
26	0	-270	0.25	1827	6	4	11	41%
26	30	-271	0.81	1714	6	4	11	41%

Project Name:	T1-P47/P46-WEST-START
Temperature Correction:	On
X Length:	60
Y Length:	30
X Spacing:	10
Y Spacing:	30
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	C
Corrosion Rate: Unit:	ÂµA/cmÂ²
Concrete Resistivity:	ohm.m
Corrosion Potential Unit:	mV/CSE
Rebar Diameter(x)[mm]:	8
Rebar Diameter(y)[mm]:	8
Duration Unit:	seconds
Thickness Unit:	centimeter

X	Y	Corrosion Potential	Corrosion Rate(Y)	Concrete Resist.(Y)	Duration Y	Cover Thickness(Y)	Temp	Humidity
0	0	-243	0.29	608	6	4	11	38%
0	30	-222	0.04	1991	6	4	11	41%
12	0	-224	0.49	1577	6	4	11	42%
12	30	-225	0.73	916	6	4	11	45%
27	0	-233	1.12	1126	6	4	10	42%
27	30	-207	0.37	1652	6	4	10	42%
40	0	-198	0.32	2537	6	4	10	43%
40	30	-199	0.72	2509	6	4	10	43%
48	0	-192	0.39	2077	6	4	10	42%
48	30	-166	0.68	2455	6	4	10	42%
60	0	-150	0.81	2713	6	4	10	46%
60	30	-124	0.65	3027	6	4	10	47%
75	0	-184	0.16	5259	6	5	10	43%
75	30	-127	0.08	5504	6	5	10	45%

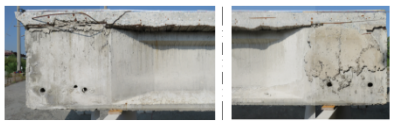
Project Name:	T1-P47/P46-WEST-END
Temperature Correction:	On
X Length:	90
Y Length:	30
X Spacing:	10
Y Spacing:	30
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	C
Corrosion Rate: Unit:	ÂµA/cmÂ²
Concrete Resistivity:	ohm.m
Corrosion Potential Unit:	mV/CSE
Rebar Diameter(x)[mm]:	8
Rebar Diameter(y)[mm]:	8
Duration Unit:	seconds
Thickness Unit:	centimeter

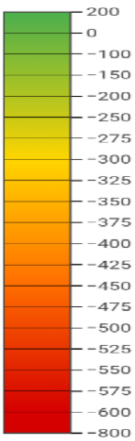
X	Y	Corrosion Potential	Corrosion Rate(Y)	Concrete Resist.(Y)	Duration Y	Cover Thickness(Y)	Temp	Humidity
0	0	-46	0.03	24470	10	2	9	40%
0	30	-59	0.06	23469	10	2	9	41%
12	0	-72	0.12	7258	10	2	9	40%
12	30	-113	0.19	2277	10	2	9	45%
29	0	-181	0.29	2291	10	2	9	40%
29	30	-164	0.16	2446	10	2	9	40%
59	0	-180	0.37	2054	6	4	9	38%
59	30	-158	0.14	3006	6	4	9	39%
71	0	-184	0.34	2358	6	4	9	42%
71	30	-202	0.24	2126	6	4	9	38%
81	0	-216	0.00	4761	6	3	9	41%
81	30	-211	0.82	1689	6	3	9	42%
94	0	-254	2.74	1051	6	3	9	43%
94	30	-281	4.71	796	6	3	9	44%
110	0	-315	0.80	400	6	3	9	44%
110	30	-334	2.13	277	6	3	9	45%
121	0	-313	0.10	1173	6	3	9	43%
121	30	-309	0.68	708	6	3	9	45%
132	0	-253	0.08	10950	6	3	9	41%
132	30	-244	0.08	10357	6	3	9	41%

ID Beam: BEAM T5-P47/P46

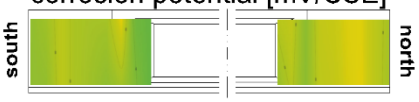
South view

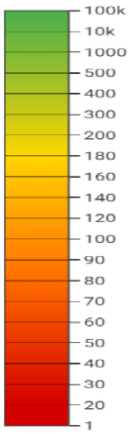
East view



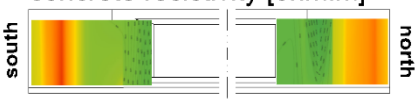


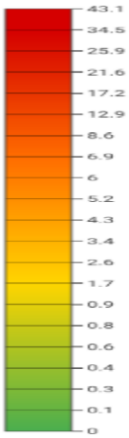
corrosion potential [mV/CSE]





concrete resistivity [ohm.m]





corrosion rate [μA/cm²]

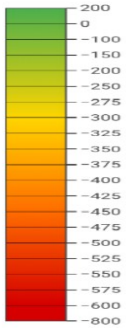
Project Name:	T5-P47/P46-EAST-START
Temperature Correction:	On
X Length:	80
Y Length:	30
X Spacing:	10
Y Spacing:	30
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	C
Corrosion Rate: Unit:	ÂµA/cmÂ²
Concrete Resistivity:	ohm.m
Corrosion Potential Unit:	mV/CSE
Rebar Diameter(x)[mm]:	8
Rebar Diameter(y)[mm]:	8
Duration Unit:	seconds
Thickness Unit:	centimeter

X	Y	Corrosion Potential	Corrosion Rate(Y)	Concrete Resist.(Y)	Duration Y	Cover Thickness(Y)	Temp	Humidity
0	0	-136	5.73	277	6	5	18	36%
0	30	-137	6.25	295	6	5	19	33%
12	0	-167	7.28	116	6	5	19	36%
12	30	-143	8.85	130	6	5	19	36%
24	0	-223	3.50	60	10	5	19	36%
24	30	-223	18.66	51	10	5	19	36%
38	0	-186	4.70	196	10	7	19	36%
38	30	-186	5.55	197	10	7	18	36%
48	0	-176	1.15	747	10	6	18	36%
48	30	-166	1.39	735	10	6	18	36%
59	0	-176	0.33	866	10	6	18	38%
59	30	-135	2.78	590	10	6	18	37%
75	0	-279	0.39	1011	10	6	18	34%
75	30	-173	1.08	358	10	6	18	36%
99	0	-44	0.30	4985	10	3	18	34%
99	30	-103	0.09	6119	10	3	18	32%
116	0	-3	0.01	17502	10	2	18	30%
116	30	8	0.04	15895	10	2	18	32%

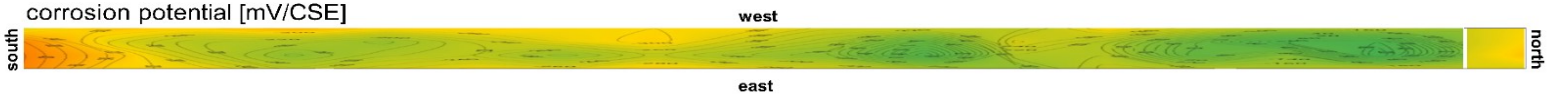
Project Name:	T5-P47/P46-EAST-END
Temperature Correction:	On
X Length:	80
Y Length:	30
X Spacing:	10
Y Spacing:	30
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	C
Corrosion Rate: Unit:	ÂµA/cmÂ²
Concrete Resistivity:	ohm.m
Corrosion Potential Unit:	mV/CSE
Rebar Diameter(x)[mm]:	8
Rebar Diameter(y)[mm]:	8
Duration Unit:	seconds
Thickness Unit:	centimeter

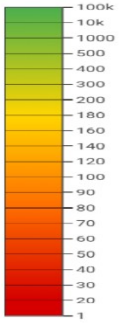
X	Y	Corrosion Potential	Corrosion Rate(Y)	Concrete Resist.(Y)	Duration Y	Cover Thickness(Y)	Temp	Humidity
0	0	-213	0.01	11394	10	4	18	34%
0	30	-151	0.01	15591	10	4	18	39%
25	0	-233	0.01	12712	10	4	18	37%
25	30	-211	0.03	15765	10	4	18	36%
58	0	-132	0.02	5262	10	5	19	39%
58	30	-130	0.04	6853	10	5	19	38%
71	0	-234	0.00	81362	10	5	19	37%
71	30	-225	0.07	7158	10	5	19	31%
84	0	-244	2.96	320	10	5	19	41%
84	30	-234	3.17	313	10	5	19	45%
93	0	-267	1.43	154	10	5	19	41%
93	30	-264	2.44	145	10	5	19	39%
105	0	-270	1.69	116	10	5	19	35%
105	30	-273	2.17	114	10	5	19	33%
118	0	-223	1.36	84	10	4	19	32%
118	30	-222	2.08	83	10	4	19	34%
128	0	-182	1.64	179	10	4	19	33%
128	30	-177	2.57	161	10	4	19	36%

ID Beam: BEAM T5-P47/P46
Bottom view

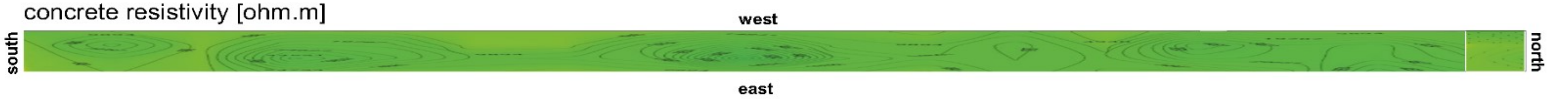


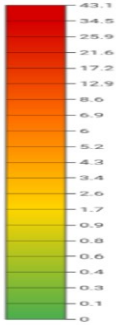
corrosion potential [mV/CSE]



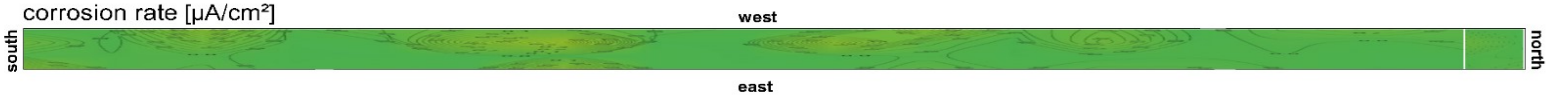


concrete resistivity [ohm.m]





corrosion rate [μA/cm²]



Project Name:	T5-P47/P46- BOTTOM
Temperature Correction:	On
X Length:	1600
Y Length:	30
X Spacing:	100
Y Spacing:	10
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	C
Corrosion Rate: Unit:	ÂµA/cmÂ²
Concrete Resistivity:	ohm.m
Corrosion Potential Unit:	mV/CSE
Rebar Diameter(x)[mm]:	15
Rebar Diameter(y)[mm]:	15
Duration Unit:	seconds
Thickness Unit:	centimeter

X	Y	Corrosion Potential	Corrosion Rate(Y)	Concrete Resist.(Y)	Duration Y	Cover Thickness(Y)	Temp	Humidity
0	0	-276	0.00	9853	6	4	9	53%
0	10	-413	0.11	528	6	4	9	52%
0	20	-424	0.03	664	6	4	9	51%
0	30	-420	0.27	202	6	4	9	49%
100	0	-324	0.02	4748	6	4	9	79%
100	10	-274	0.00	27113	6	4	9	80%
100	20	-336	0.02	9296	6	4	8	80%
100	30	-309	0.02	5321	6	4	8	81%
200	30	-290	0.04	2249	6	4	8	80%
200	20	-223	0.02	1461	6	4	8	80%
200	10	-202	0.14	1332	6	4	8	81%
200	0	-313	0.29	2436	6	4	8	80%
300	0	-354	0.02	3827	6	4	8	76%
300	10	-194	0.00	25176	6	4	8	75%
300	20	-133	0.00	51332	6	4	8	74%
300	30	-210	0.00	21162	10	4	8	75%
400	0	-309	0.07	3011	6	4	8	75%
400	10	-152	0.01	23227	6	4	8	76%
400	20	-195	0.00	32303	6	4	8	76%
400	30	-254	0.01	3317	6	4	8	76%
500	30	-286	0.00	6688	6	4	8	74%
500	20	-221	0.00	13674	6	4	8	74%
500	10	-226	0.26	905	6	4	8	75%
500	0	-316	0.10	1305	6	4	8	75%

600	30	-280	0.32	1056	6	4	8	74%
600	20	-148	0.01	15971	6	4	8	75%
600	10	-282	0.43	1245	6	4	8	77%
600	0	-294	0.07	1295	6	4	8	76%
700	30	-315	0.00	6647	6	4	8	72%
700	20	-229	0.01	24623	6	4	8	72%
700	10	-311	0.00	24314	6	4	8	71%
700	0	-300	0.03	1798	6	4	8	71%
800	0	-296	0.01	6866	10	4	8	70%
800	10	-247	0.00	45551	6	4	8	69%
800	20	-165	0.00	90624	6	4	8	69%
800	30	-282	0.00	4678	6	4	8	71%
900	30	-257	0.00	12324	6	4	8	69%
900	20	-118	0.01	26425	6	4	8	69%
900	10	-177	0.33	12039	6	4	8	68%
900	0	-248	0.00	7381	6	4	8	66%
1000	30	-202	0.06	3851	6	4	8	67%
1000	20	101	0.02	15902	6	4	8	67%
1000	10	-15	0.06	9850	6	4	8	70%
1000	0	-251	0.28	3109	6	4	8	70%
1100	30	-133	0.01	18623	6	4	8	69%
1100	20	-195	0.00	19981	6	4	8	69%
1100	10	-267	0.00	22510	6	4	8	68%
1100	0	-206	0.05	11373	6	4	8	67%
1200	30	-230	0.04	8871	6	4	8	67%
1200	20	-200	0.01	13246	6	4	8	69%
1200	10	-193	0.13	6017	6	4	8	69%
1200	0	-301	0.10	735	6	4	8	67%
1300	0	-249	0.00	9591	6	4	8	66%
1300	10	-33	0.00	49461	6	4	8	64%
1300	20	-1	0.01	35866	10	4	8	65%
1300	30	-214	0.04	6810	6	4	8	66%
1400	30	-185	0.02	22750	6	4	8	63%
1400	20	-123	0.02	32816	6	4	8	61%
1400	10	158	0.03	30231	6	4	8	59%
1400	0	-194	0.06	5565	6	4	8	60%
1500	30	-278	0.00	53470	6	4	8	57%
1500	20	228	0.00	37237	6	4	8	62%
1500	10	178	0.00	36821	6	4	8	64%
1500	0	-214	0.10	5008	6	4	8	64%
1600	30	-227	0.00	35857	6	4	8	59%
1600	20	-69	0.00	26102	6	4	8	58%
1600	10	-129	0.04	14219	6	4	8	61%
1600	0	-144	0.04	9906	6	4	8	64%

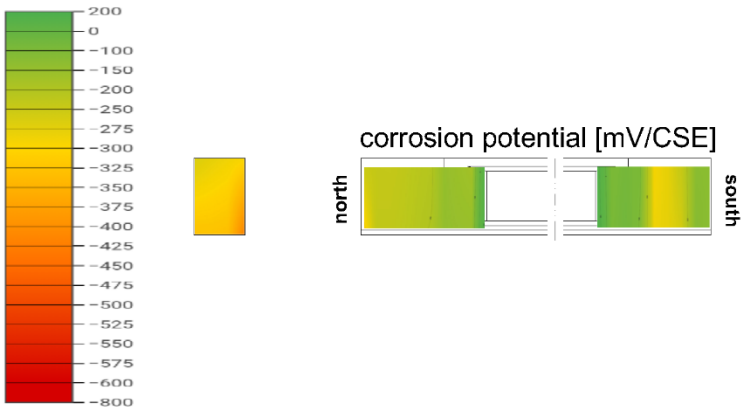
Project Name:	T5-P47/P46-BOTTOM-END
Temperature Correction:	On
X Length:	100
Y Length:	30
X Spacing:	100
Y Spacing:	10
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	C
Corrosion Rate: Unit:	ÂµA/cmÂ²
Concrete Resistivity:	ohm.m
Corrosion Potential Unit:	mV/CSE
Rebar Diameter(x)[mm]:	15
Rebar Diameter(y)[mm]:	15
Duration Unit:	seconds
Thickness Unit:	centimeter

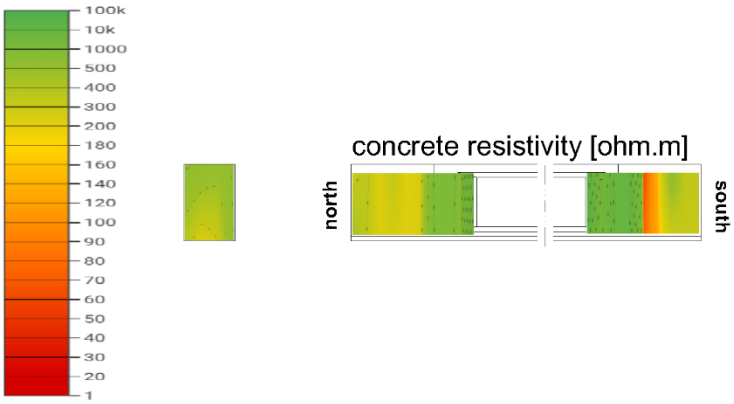
X	Y	Corrosion Potential	Corrosion Rate(Y)	Concrete Resist.(Y)	Duration Y	Cover Thickness(Y)	Temp	Humidity
0	0	-257	0.02	11518	6	4	8	56%
0	10	-253	0.11	380	6	4	8	59%
0	20	-266	0.03	1304	10	4	8	57%
0	30	-268	0.01	3046	10	4	8	58%
60	30	-264	0.05	2412	10	4	8	57%
60	20	-326	0.01	8042	6	4	8	57%
60	10	-302	0.00	2716	6	4	8	63%
60	0	-293	0.01	16948	6	4	8	62%

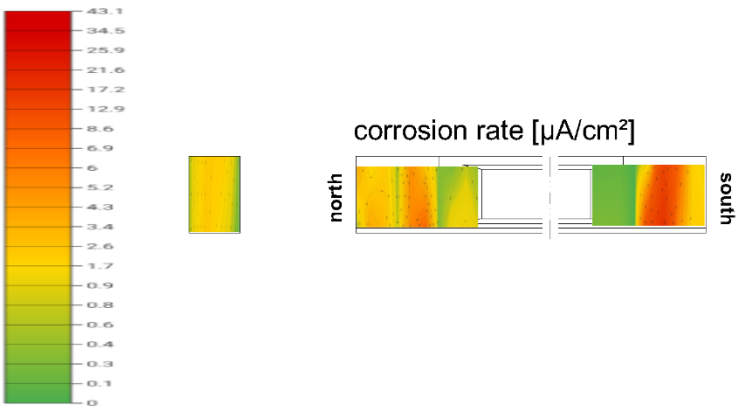
ID Beam: BEAM T5-P47/P46

North view

West view







Project Name:	T5-P47/P46-NORTH-SECTION
Temperature Correction:	On
X Length:	30
Y Length:	30
X Spacing:	10
Y Spacing:	30
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	C
Corrosion Rate: Unit:	ÂµA/cmÂ²
Concrete Resistivity:	ohm.m
Corrosion Potential Unit:	mV/CSE
Rebar Diameter(x)[mm]:	8
Rebar Diameter(y)[mm]:	8
Duration Unit:	seconds
Thickness Unit:	centimeter

X	Y	Corrosion Potential	Corrosion Rate(Y)	Concrete Resist.(Y)	Duration Y	Cover Thickness(Y)	Temp	Humidity
0	0	-266	0.58	618	10	3	19	30%
0	30	-329	0.55	370	10	3	19	32%
10	0	-278	2.35	579	10	2	19	29%
10	30	-328	2.48	224	10	2	19	34%
19	0	-287	2.15	528	10	3	19	29%
19	30	-332	1.40	289	10	3	18	30%
29	0	-296	0.20	621	10	3	18	29%
29	30	-419	0.05	611	10	3	18	30%

Project Name:	T5-P47/P46-WEST-START
Temperature Correction:	On
X Length:	90
Y Length:	30
X Spacing:	10
Y Spacing:	30
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	C
Corrosion Rate: Unit:	ÂµA/cmÂ²
Concrete Resistivity:	ohm.m
Corrosion Potential Unit:	mV/CSE
Rebar Diameter(x)[mm]:	8
Rebar Diameter(y)[mm]:	8
Duration Unit:	seconds
Thickness Unit:	centimeter

X	Y	Corrosion Potential	Corrosion Rate(Y)	Concrete Resist.(Y)	Duration Y	Cover Thickness(Y)	Temp	Humidity
0	0	-248	3.92	296	10	5	18	40%
0	30	-308	0.31	445	10	5	18	36%
14	0	-237	1.48	366	10	5	18	40%
14	30	-231	3.91	344	10	5	18	35%
28	0	-238	2.34	230	10	5	17	34%
28	30	-231	2.93	228	10	5	17	34%
44	0	-230	0.45	324	10	5	17	36%
44	30	-222	0.66	265	10	5	17	40%
54	0	-213	5.15	224	10	5	17	38%
54	30	-206	5.47	222	10	5	16	34%
64	0	-205	2.41	251	10	5	16	36%
64	30	-198	7.35	241	10	5	16	34%
76	0	-145	0.33	1017	10	5	16	32%
76	30	-144	0.23	1007	10	5	16	31%
86	0	-161	0.26	1307	10	5	16	31%
86	30	-149	1.14	1227	10	5	16	32%
108	0	-174	0.71	811	10	3	16	37%
108	30	-152	1.37	798	10	3	16	37%
124	0	107	0.39	6088	10	2	16	33%
124	30	130	0.78	6002	10	2	16	33%

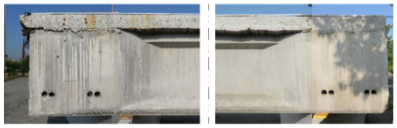
Project Name:	T5-P47/P46-WEST-END
Temperature Correction:	On
X Length:	80
Y Length:	30
X Spacing:	10
Y Spacing:	30
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	C
Corrosion Rate: Unit:	ÂµA/cmÂ²
Concrete Resistivity:	ohm.m
Corrosion Potential Unit:	mV/CSE
Rebar Diameter(x)[mm]:	8
Rebar Diameter(y)[mm]:	8
Duration Unit:	seconds
Thickness Unit:	centimeter

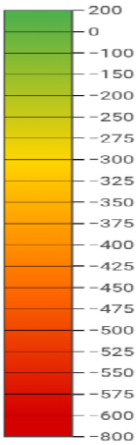
X	Y	Corrosion Potential	Corrosion Rate(Y)	Concrete Resist.(Y)	Duration Y	Cover Thickness(Y)	Temp	Humidity
0	0	131	0.07	11631	6	3	20	42%
0	30	158	0.26	11339	6	3	20	38%
10	0	-94	0.09	3561	6	2	19	34%
10	30	-85	0.25	2714	6	2	19	34%
29	0	-67	0.10	8871	6	2	19	31%
29	30	-54	0.24	8502	6	2	19	33%
57	0	-91	0.01	9208	6	5	19	32%
57	30	-104	0.02	8392	6	5	18	33%
70	0	-291	1.57	58	10	4	18	33%
70	30	-285	11.70	74	10	4	18	32%
82	0	-277	13.48	130	10	3	18	46%
82	30	-277	17.87	129	10	3	18	38%
101	0	-241	8.04	572	10	3	18	34%
101	30	-257	5.79	294	10	3	18	35%
117	0	-125	2.13	329	10	3	18	43%
117	30	-117	2.12	329	10	3	18	49%
125	0	-127	1.21	360	10	3	18	36%
125	30	-128	2.21	305	10	3	18	39%

ID Beam: BEAM T10-P47/P46

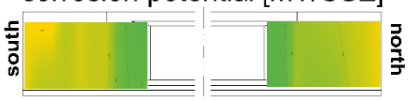
South view

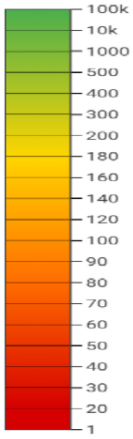
East view



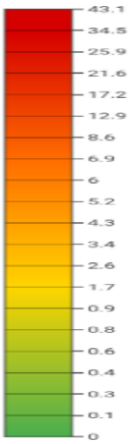


corrosion potential [mV/CSE]

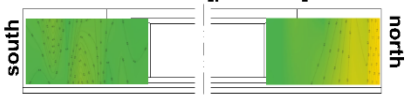




concrete resistivity [ohm.m]



corrosion rate [μA/cm²]



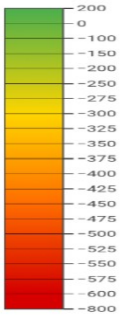
Project Name:	T10-P47/P46-EAST-START
Temperature Correction:	On
X Length:	90
Y Length:	30
X Spacing:	10
Y Spacing:	30
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	C
Corrosion Rate: Unit:	ÂµA/cmÂ²
Concrete Resistivity:	ohm.m
Corrosion Potential Unit:	mV/CSE
Rebar Diameter(x)[mm]:	8
Rebar Diameter(y)[mm]:	8
Duration Unit:	seconds
Thickness Unit:	centimeter

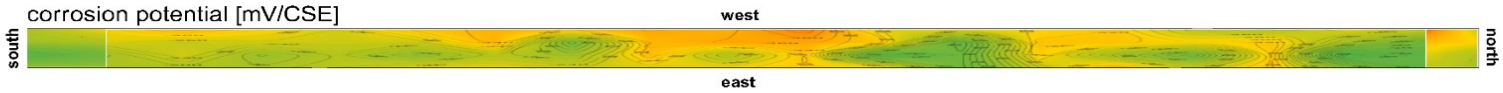
X	Y	Corrosion Potential	Corrosion Rate(Y)	Concrete Resist.(Y)	Duration Y	Cover Thickness(Y)	Temp	Humidity
0	0	-290	0.05	3537	6	5	10	42%
0	30	-283	0.03	3623	6	5	10	41%
24	0	-311	0.07	1415	6	5	10	40%
24	30	-219	0.01	4230	6	5	10	40%
37	0	-308	0.25	1440	6	5	10	41%
37	30	-214	0.03	8866	6	5	9	40%
49	0	-214	0.00	4896	6	6	9	42%
49	30	-215	0.04	5062	6	6	9	41%
61	0	-265	0.08	1179	6	5	9	40%
61	30	-260	0.33	1098	6	5	9	42%
78	0	-227	0.11	1810	6	6	9	42%
78	30	-241	0.17	1347	6	6	9	44%
93	0	-248	0.06	3616	6	5	8	43%
93	30	-221	0.00	7387	6	5	8	43%
107	0	-25	0.02	14579	6	3	8	44%
107	30	-42	0.06	14058	6	3	8	45%
120	0	41	0.01	10231	6	3	8	44%
120	30	29	0.03	10892	6	3	8	45%
135	0	117	0.01	26282	6	2	8	45%
135	30	-45	0.04	14422	6	2	8	44%

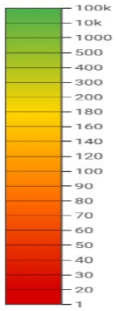
Project Name:	T10-P47/P46-EAST-END
Temperature Correction:	On
X Length:	80
Y Length:	30
X Spacing:	10
Y Spacing:	30
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	C
Corrosion Rate: Unit:	ÂµA/cmÂ²
Concrete Resistivity:	ohm.m
Corrosion Potential Unit:	mV/CSE
Rebar Diameter(x)[mm]:	8
Rebar Diameter(y)[mm]:	8
Duration Unit:	seconds
Thickness Unit:	centimeter

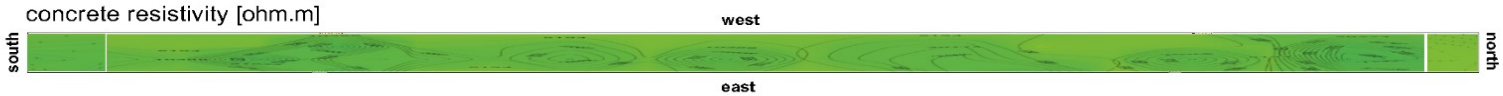
X	Y	Corrosion Potential	Corrosion Rate(Y)	Concrete Resist.(Y)	Duration Y	Cover Thickness(Y)	Temp	Humidity
0	0	78	0.00	29250	6	4	7	46%
0	30	72	0.01	22776	6	4	7	47%
13	0	59	0.00	27683	6	4	7	46%
13	30	82	0.01	19067	10	5	7	47%
47	0	-145	0.14	2596	10	5	7	47%
47	30	-168	0.07	2753	6	5	7	47%
59	0	-173	0.08	3811	6	4	7	47%
59	30	-133	0.12	4355	6	4	7	47%
68	0	-182	0.02	6181	6	3	7	47%
68	30	-144	0.29	5604	6	3	6	46%
78	0	-200	0.29	2609	6	3	6	47%
78	30	-159	0.55	4402	6	3	6	49%
91	0	-243	0.74	1421	6	3	6	75%
91	30	-221	0.78	1435	6	3	6	77%
101	0	-263	0.61	823	6	3	6	78%
101	30	-257	0.74	786	6	3	6	78%
114	0	-293	1.62	639	6	2	6	78%
114	30	-289	2.06	646	6	2	5	78%

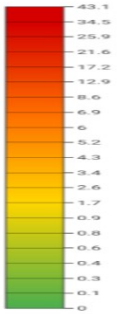
ID Beam: BEAM T10-P47/P46
Bottom view

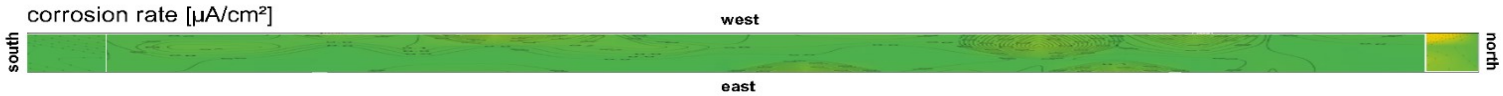












Project Name:	T10-P47/P46-BOTTOM-START
Temperature Correction:	On
X Length:	100
Y Length:	30
X Spacing:	100
Y Spacing:	10
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	C
Corrosion Rate: Unit:	ÂµA/cmÂ²
Concrete Resistivity:	ohm.m
Corrosion Potential Unit:	mV/CSE
Rebar Diameter(x)[mm]:	15
Rebar Diameter(y)[mm]:	15
Duration Unit:	seconds
Thickness Unit:	centimeter

X	Y	Corrosion Potential	Corrosion Rate(Y)	Concrete Resist.(Y)	Duration Y	Cover Thickness(Y)	Temp	Humidity
0	0	-196	0.02	4940	6	4	11	46%
0	10	-170	0.00	19797	6	4	11	45%
0	20	43	0.01	51705	6	4	11	46%
0	30	-155	0.02	3529	6	4	11	45%
100	30	-149	0.00	59014	6	4	11	44%
100	20	-49	0.00	33201	6	4	10	45%
100	0	-300	0.04	2119	6	4	10	44%
100	10	-189	0.02	31106	6	4	10	44%

Project Name:	T10-P47/P46-BOTTOM
Temperature Correction:	On
X Length:	1700
Y Length:	30
X Spacing:	100
Y Spacing:	10
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	C
Corrosion Rate: Unit:	ÂµA/cmÂ²
Concrete Resistivity:	ohm.m
Corrosion Potential Unit:	mV/CSE
Rebar Diameter(x)[mm]:	15
Rebar Diameter(y)[mm]:	15
Duration Unit:	seconds
Thickness Unit:	centimeter

X	Y	Corrosion Potential	Corrosion Rate(Y)	Concrete Resist.(Y)	Duration Y	Cover Thickness(Y)	Temp	Humidity
0	30	-197	0.02	6216	6	4	9	74%
0	20	-176	0.01	19512	6	4	9	73%
0	10	-266	0.01	4762	6	4	9	70%
0	0	-290	0.03	1219	6	4	9	70%
100	0	-348	0.02	3738	6	4	9	66%
100	10	-243	0.08	2394	6	4	9	67%
100	20	-259	0.02	10389	6	4	9	64%
100	30	-185	0.01	3965	6	4	9	63%
200	0	-302	0.02	3121	6	4	9	56%
200	10	-254	0.07	3849	6	4	9	59%
200	20	-156	0.00	85089	10	4	9	57%
200	30	-186	0.00	5257	6	4	8	60%
300	0	-261	0.10	2128	6	4	8	59%
300	10	-250	0.00	78196	6	4	9	60%
300	20	-207	0.00	20542	6	4	9	56%
300	30	-221	0.00	57411	6	4	9	55%
400	0	-325	0.04	1998	6	4	9	54%
400	10	-247	0.06	6736	6	4	9	56%
400	20	-139	0.00	28985	6	4	9	54%
400	30	-283	0.03	1419	6	4	9	53%
500	0	-349	0.39	1704	6	4	9	61%
500	10	-351	0.01	8518	6	4	9	61%
500	20	-212	0.01	10666	6	4	9	62%
500	30	-285	0.03	1610	6	4	9	63%
600	0	-339	0.14	657	10	4	9	59%
600	10	-88	0.06	16537	6	4	9	55%
600	20	-172	0.01	32013	6	4	9	57%
600	30	-261	0.01	4855	6	4	9	58%
700	0	-363	0.01	1863	6	4	9	55%
700	10	-342	0.08	1834	6	4	9	57%
700	20	-338	0.01	5700	6	4	9	58%
700	30	-262	0.00	3273	6	4	9	57%
800	0	-351	0.02	1573	10	4	9	57%
800	10	-364	0.03	8933	10	4	9	54%
800	20	-202	0.00	50424	10	4	9	51%
800	30	-292	0.00	8286	10	4	9	55%
900	0	-417	0.04	2597	6	4	9	52%
900	10	-363	0.03	4597	10	4	10	52%
900	20	-328	0.01	5142	10	4	9	53%
900	30	-318	0.26	1461	6	4	9	52%
1000	30	-336	0.01	5819	6	4	10	54%

1000	0	-274	0.06	3475	6	4	10	53%
1000	10	-319	0.00	14566	6	4	10	54%
1000	20	41	0.01	19703	6	4	10	54%
1100	0	-290	0.03	2920	6	4	10	50%
1100	10	-19	0.02	20830	6	4	10	50%
1100	20	-48	0.00	29029	6	4	10	50%
1100	30	-50	0.04	28906	6	4	10	50%
1200	0	-302	0.21	5586	6	4	10	49%
1200	10	-326	0.29	433	6	4	10	48%
1200	20	-310	0.02	9423	6	4	9	49%
1200	30	-237	0.00	39065	6	4	9	48%
1300	0	-319	0.03	1895	10	4	9	49%
1300	10	-326	0.03	2681	6	4	9	49%
1300	20	-175	0.00	5045	6	4	9	49%
1300	30	-359	0.22	772	10	4	9	51%
1400	0	-231	0.20	2466	6	4	9	50%
1400	10	-304	0.08	3561	6	4	9	53%
1400	20	-63	0.00	43193	6	4	9	51%
1400	30	-250	0.00	13796	6	4	9	51%
1500	0	-217	0.01	18374	6	4	9	51%
1500	10	-323	0.01	6447	6	4	9	51%
1500	20	-323	0.02	4878	6	4	9	51%
1500	30	-325	0.03	4640	6	4	9	50%
1600	30	-133	0.00	38236	6	4	9	52%
1600	20	95	0.00	88802	10	4	9	54%
1600	10	-172	0.00	77360	10	4	9	53%
1600	0	-280	0.04	4777	6	4	9	53%
1700	0	-249	0.02	4074	6	4	9	50%
1700	10	-50	0.01	50141	6	4	9	52%
1700	20	21	0.00	76380	10	4	9	51%
1700	30	32	0.00	53845	10	4	9	52%

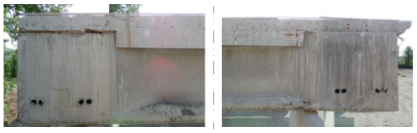
Project Name:	T10-P47/P46-BOTTOM-END
Temperature Correction:	On
X Length:	100
Y Length:	30
X Spacing:	100
Y Spacing:	10
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	C
Corrosion Rate: Unit:	ÂµA/cmÂ²
Concrete Resistivity:	ohm.m
Corrosion Potential Unit:	mV/CSE
Rebar Diameter(x)[mm]:	15
Rebar Diameter(y)[mm]:	15
Duration Unit:	seconds
Thickness Unit:	centimeter

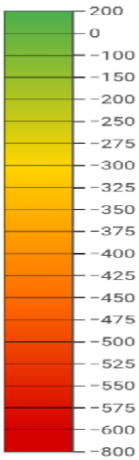
X	Y	Corrosion Potential	Corrosion Rate(Y)	Concrete Resist.(Y)	Duration Y	Cover Thickness(Y)	Temp	Humidity
70	30	-186	0.16	786	6	4	11	45%
70	20	-197	0.03	1061	6	4	11	48%
70	10	-303	0.09	1684	6	4	11	48%
70	0	-259	0.02	3429	6	4	11	47%
0	0	-427	2.10	2574	6	4	11	47%
0	10	-334	0.18	1005	6	4	11	49%
0	30	-234	0.34	1526	6	4	10	48%
0	20	-273	0.48	941	6	4	10	50%

ID Beam: BEAM T10-P47/P46

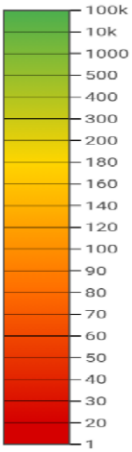
North view

West view

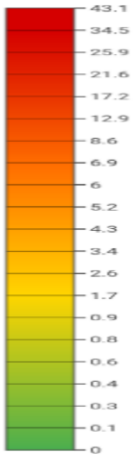




corrosion potential [mV/CSE]



concrete resistivity [ohm.m]



corrosion rate [µA/cm²]

Project Name:	T10-P47/P46-NORTH-SECTION
Temperature Correction:	On
X Length:	30
Y Length:	30
X Spacing:	10
Y Spacing:	30
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	C
Corrosion Rate: Unit:	ÂµA/cmÂ²
Concrete Resistivity:	ohm.m
Corrosion Potential Unit:	mV/CSE
Rebar Diameter(x)[mm]:	8
Rebar Diameter(y)[mm]:	8
Duration Unit:	seconds
Thickness Unit:	centimeter

X	Y	Corrosion Potential	Corrosion Rate(Y)	Concrete Resist.(Y)	Duration Y	Cover Thickness(Y)	Temp	Humidity
0	0	-349	0.52	742	6	2	5	81%
0	30	-334	0.29	846	6	2	5	81%
12	0	-333	0.92	538	6	2	5	82%
12	30	-348	1.33	657	6	2	5	83%
22	0	-321	0.54	806	6	3	5	83%
22	30	-330	0.56	787	6	3	5	83%
32	0	-352	0.10	1415	6	3	5	83%
32	30	-349	1.05	1031	6	3	5	84%

Project Name:	T10-P47/P46-WEST-START
Temperature Correction:	On
X Length:	70
Y Length:	30
X Spacing:	10
Y Spacing:	30
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	C
Corrosion Rate: Unit:	ÂµA/cmÂ²
Concrete Resistivity:	ohm.m
Corrosion Potential Unit:	mV/CSE
Rebar Diameter(x)[mm]:	8
Rebar Diameter(y)[mm]:	8
Duration Unit:	seconds
Thickness Unit:	centimeter

X	Y	Corrosion Potential	Corrosion Rate(Y)	Concrete Resist.(Y)	Duration Y	Cover Thickness(Y)	Temp	Humidity
0	0	-323	0.40	1019	10	4	18	36%
0	30	-322	0.67	991	10	4	18	37%
12	0	-292	2.67	465	10	5	19	36%
12	30	-294	5.87	460	10	5	18	37%
29	0	-278	1.35	954	10	5	18	36%
29	30	-278	1.74	934	6	5	18	38%
40	0	-267	0.73	840	6	5	18	37%
40	30	-263	0.81	836	10	5	18	38%
51	0	-263	0.64	584	6	5	17	38%
51	30	-261	2.49	543	6	5	17	38%
66	0	-254	0.44	674	6	5	17	38%
66	30	-244	4.83	592	6	5	17	37%
81	0	-238	1.86	1006	6	7	17	39%
81	30	-227	3.21	979	6	7	16	39%
108	0	68	0.08	27447	6	4	16	40%
135	30	-221	5.15	748	6	4	16	43%
157	0	-124	0.05	13237	6	2	15	45%

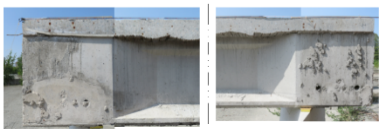
Project Name:	T10-P47/P46-WEST-END
Temperature Correction:	On
X Length:	80
Y Length:	30
X Spacing:	10
Y Spacing:	30
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	C
Corrosion Rate: Unit:	ÂµA/cmÂ²
Concrete Resistivity:	ohm.m
Corrosion Potential Unit:	mV/CSE
Rebar Diameter(x)[mm]:	8
Rebar Diameter(y)[mm]:	8
Duration Unit:	seconds
Thickness Unit:	centimeter

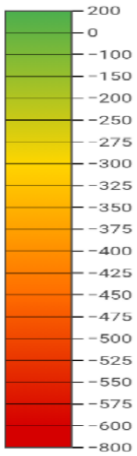
X	Y	Corrosion Potential	Corrosion Rate(Y)	Concrete Resist.(Y)	Duration Y	Cover Thickness(Y)	Temp	Humidity
0	0	-313	0.43	884	6	2	15	43%
0	30	-307	1.18	731	6	2	15	45%
15	0	-287	0.95	980	6	3	15	42%
15	30	-285	1.79	961	6	3	14	43%
29	0	-284	1.90	947	6	3	14	42%
29	30	-284	0.80	965	6	3	14	43%
46	0	-278	3.61	516	6	4	14	42%
46	30	-277	1.73	547	6	4	14	43%
54	0	-273	1.11	796	6	4	14	44%
54	30	-269	2.58	792	6	4	14	47%
74	0	-260	0.35	527	6	4	14	46%
74	30	-264	7.03	645	6	4	14	47%
87	0	-221	0.51	872	10	4	14	72%
87	30	-226	0.77	853	10	4	14	75%
97	0	-244	0.73	699	10	4	14	76%
97	30	-239	1.13	686	10	4	14	75%
110	0	-263	1.02	896	10	4	14	72%
110	30	-259	2.39	876	10	4	14	71%

ID Beam: BEAM T6-P47/P46

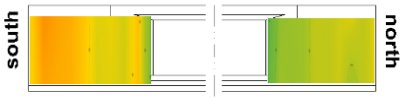
South view

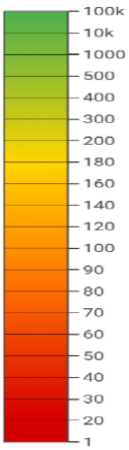
East view



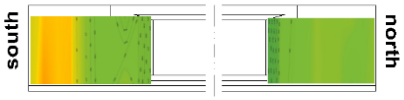


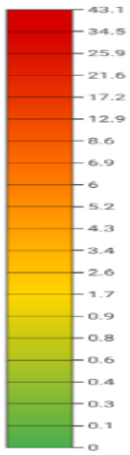
corrosion potential [mV/CSE]



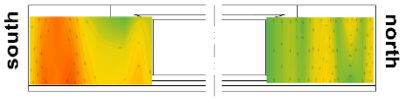


concrete resistivity [ohm.m]





corrosion rate [μA/cm²]



Project Name:	T6-P47/P46-SUD-SECTION
Temperature Correction:	On
X Length:	30
Y Length:	30
X Spacing:	10
Y Spacing:	30
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	C
Corrosion Rate: Unit:	ÂµA/cmÂ²
Concrete Resistivity:	ohm.m
Corrosion Potential Unit:	mV/CSE
Rebar Diameter(x)[mm]:	8
Rebar Diameter(y)[mm]:	8
Duration Unit:	seconds
Thickness Unit:	centimeter

X	Y	Corrosion Potential	Corrosion Rate(Y)	Concrete Resist.(Y)	Duration Y	Cover Thickness(Y)	Temp	Humidity
0	0	-167	0.93	952	6	6	20	41%
0	30	-174	0.73	1031	10	6	21	68%
9	0	-171	0.52	808	10	6	20	66%
9	30	-171	0.98	772	10	6	20	67%
20	0	-161	0.06	819	10	7	20	30%
20	30	-165	0.52	669	10	7	21	38%
28	0	-164	0.50	879	10	6	21	39%
28	30	-162	0.47	826	10	6	21	42%

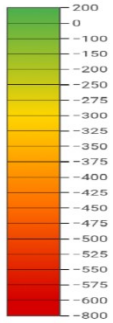
Project Name:	T6-P47/P46-EAST-START
Temperature Correction:	On
X Length:	90
Y Length:	30
X Spacing:	10
Y Spacing:	30
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	C
Corrosion Rate: Unit:	ÂµA/cmÂ²
Concrete Resistivity:	ohm.m
Corrosion Potential Unit:	mV/CSE
Rebar Diameter(x)[mm]:	8
Rebar Diameter(y)[mm]:	8
Duration Unit:	seconds
Thickness Unit:	centimeter

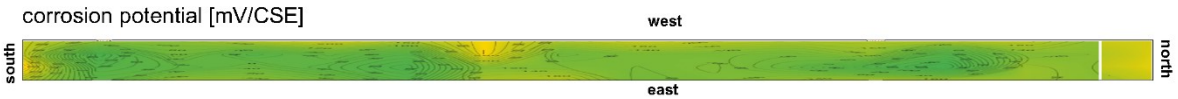
X	Y	Corrosion Potential	Corrosion Rate(Y)	Concrete Resist.(Y)	Duration Y	Cover Thickness(Y)	Temp	Humidity
0	0	-295	1.03	266	10	5	21	58%
0	30	-295	1.20	247	10	5	21	61%
14	0	-398	4.62	152	10	5	20	52%
14	30	-372	7.26	115	10	5	20	51%
24	0	-372	6.97	158	10	4	20	45%
24	30	-360	6.24	158	10	4	20	42%
37	0	-356	3.99	154	10	4	20	39%
37	30	-353	8.71	148	10	4	20	37%
48	0	-321	0.84	515	10	4	19	35%
48	30	-319	3.60	493	10	4	19	34%
60	0	-270	0.53	1470	10	4	19	31%
60	30	-265	1.61	1388	10	4	19	35%
71	0	-282	0.27	1267	6	4	19	34%
71	30	-275	1.67	1292	6	4	19	34%
87	0	-259	0.06	2214	6	6	19	35%
87	30	-259	1.91	538	6	6	19	40%
99	0	-330	0.74	1232	6	3	18	39%
99	30	-330	3.35	1168	6	3	18	40%
114	0	-78	0.68	3413	6	1	18	37%
114	30	-70	0.73	3376	6	1	18	36%

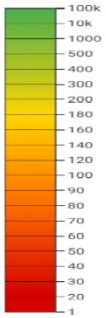
Project Name:	T6-P47/P46-EAST-END
Temperature Correction:	On
X Length:	90
Y Length:	30
X Spacing:	10
Y Spacing:	30
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	C
Corrosion Rate: Unit:	ÂµA/cmÂ²
Concrete Resistivity:	ohm.m
Corrosion Potential Unit:	mV/CSE
Rebar Diameter(x)[mm]:	8
Rebar Diameter(y)[mm]:	8
Duration Unit:	seconds
Thickness Unit:	centimeter

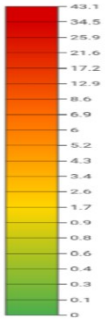
X	Y	Corrosion Potential	Corrosion Rate(Y)	Concrete Resist.(Y)	Duration Y	Cover Thickness(Y)	Temp	Humidity
0	0	25	0.01	48589	6	3	18	45%
0	30	1	0.01	48242	6	3	18	42%
31	0	-140	0.34	3489	6	3	17	36%
31	30	-167	0.34	1980	6	6	17	50%
53	0	-159	0.63	1839	6	6	17	55%
53	30	-153	0.65	1798	6	6	17	54%
63	0	-168	0.16	1485	6	5	17	55%
63	30	-168	0.32	1343	6	5	17	55%
77	0	-236	0.89	600	6	4	16	44%
77	30	-231	0.95	586	6	4	16	50%
85	0	-226	1.16	707	6	4	16	47%
85	30	-224	1.95	693	6	4	16	49%
96	0	-256	0.21	731	6	4	16	51%
96	30	-255	0.40	666	6	4	16	52%
109	0	-271	1.44	599	6	4	16	50%
109	30	-172	0.05	1855	6	4	16	50%
119	0	-228	0.34	1207	6	3	16	56%
119	30	-227	0.39	1001	6	3	16	59%
129	0	-278	1.37	580	6	3	16	59%
129	30	-273	1.84	602	6	3	16	57%

ID Beam: BEAM T6-P47/P46
Bottom view









Project Name:	T6-P47/P46-BOTT0M
Temperature Correction:	On
X Length:	1400
Y Length:	30
X Spacing:	100
Y Spacing:	10
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	C
Corrosion Rate: Unit:	ÂµA/cmÂ²
Concrete Resistivity:	ohm.m
Corrosion Potential Unit:	mV/CSE
Rebar Diameter(x)[mm]:	15
Rebar Diameter(y)[mm]:	15
Duration Unit:	seconds
Thickness Unit:	centimeter

X	Y	Corrosion Potential	Corrosion Rate(Y)	Concrete Resist.(Y)	Duration Y	Cover Thickness(Y)	Temp	Humidity
0	30	-204	0.15	291	10	4	15	26%
0	0	-235	0.00	16272	6	4	16	30%
0	10	-240	0.00	4463	6	4	15	27%
0	20	-329	0.01	9470	6	4	15	26%
100	0	-137	0.01	8027	6	4	15	27%
100	10	178	0.00	89830	6	4	14	26%
100	20	102	0.00	30274	6	4	14	26%
100	30	38	0.00	72780	6	4	14	35%
200	0	-120	0.01	15304	6	4	14	29%
200	10	-61	0.00	21090	10	4	13	29%
200	20	46	0.01	24938	6	4	13	31%
200	30	-153	0.02	5688	6	4	13	28%
300	0	-199	0.28	2685	6	4	12	34%
300	10	70	0.00	61296	6	4	12	33%
300	20	-30	0.02	40152	6	4	12	37%
300	30	-138	0.02	3431	6	4	12	36%
400	0	-248	0.26	3007	6	4	12	31%
400	10	-9	0.00	25259	6	4	12	34%
400	20	66	0.07	20410	6	4	12	31%
400	30	-76	0.01	7138	6	4	11	33%
500	0	-185	0.01	5352	6	4	11	30%
500	10	76	0.05	26208	6	4	11	32%
500	20	160	0.01	18837	6	4	11	31%

500	30	80	0.02	16674	6	4	11	33%
600	0	-298	0.04	3285	6	4	12	29%
600	10	-301	0.01	2947	6	4	11	32%
600	20	-113	0.00	33728	6	4	11	34%
600	30	-187	0.06	7196	6	4	11	34%
700	0	-182	0.06	9502	6	4	11	30%
700	10	-51	0.04	16323	6	4	11	34%
700	20	-103	0.02	14238	6	4	11	32%
700	30	-220	0.56	1386	6	4	11	33%
800	0	-237	0.02	1103	6	4	11	32%
800	10	-92	0.06	17162	6	4	11	30%
800	20	-79	0.02	16113	6	4	11	34%
800	30	-68	0.09	14705	6	4	11	34%
900	0	-205	0.07	2096	6	4	11	32%
900	10	-89	0.09	21458	6	4	11	32%
900	20	-107	0.00	27749	6	4	11	32%
900	30	-92	0.05	22320	6	4	11	32%
1000	0	-180	0.00	9003	6	4	11	34%
1000	10	-68	0.01	22063	6	4	11	32%
1000	20	-18	0.03	16843	6	4	11	36%
1000	30	-149	0.13	5113	6	4	11	35%
1100	0	-190	0.04	1343	6	4	11	33%
1100	10	-134	0.03	15391	6	4	11	35%
1100	20	127	0.00	23513	6	4	11	32%
1100	30	-201	0.03	3764	6	4	11	33%
1200	0	-199	0.04	1694	6	4	11	30%
1200	10	116	0.00	73462	6	4	11	32%
1200	20	236	0.01	32968	6	4	11	33%
1200	30	-206	0.00	5187	6	4	11	34%
1300	0	-215	0.09	3306	6	4	11	34%
1300	10	-105	0.00	39472	6	4	11	31%
1300	20	-153	0.09	1874	6	4	11	34%
1300	30	-154	0.22	1642	6	4	11	35%
1400	0	-123	0.00	22857	10	4	11	31%
1400	30	-123	0.00	17780	10	4	11	31%
1400	10	-123	0.00	17325	10	4	11	30%
1400	20	-117	0.01	17593	10	4	11	30%

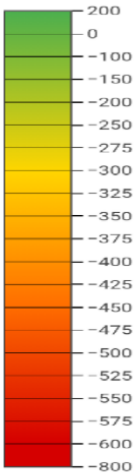
Project Name:	T6-P47/P46-BOTTOM-END
Temperature Correction:	On
X Length:	100
Y Length:	30
X Spacing:	100
Y Spacing:	10
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	C
Corrosion Rate: Unit:	ÂµA/cmÂ²
Concrete Resistivity:	ohm.m
Corrosion Potential Unit:	mV/CSE
Rebar Diameter(x)[mm]:	15
Rebar Diameter(y)[mm]:	15
Duration Unit:	seconds
Thickness Unit:	centimeter

X	Y	Corrosion Potential	Corrosion Rate(Y)	Concrete Resist.(Y)	Duration Y	Cover Thickness(Y)	Temp	Humidity
0	0	-253	0.10	2343	6	4	11	34%
0	10	-208	0.19	2424	6	4	11	34%
0	20	-243	0.20	2131	6	4	11	35%
0	30	-159	1.12	3366	6	4	11	35%
100	0	-260	0.03	1690	6	4	11	32%
100	10	-268	0.03	902	6	4	11	32%
100	20	-276	0.01	1533	6	4	11	32%
100	30	-249	0.28	2325	6	4	10	42%

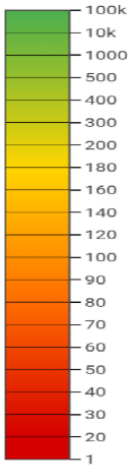
ID Beam: BEAM T6-P47/P46

North view

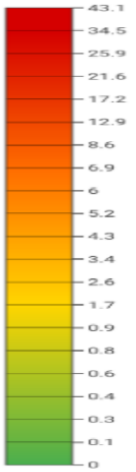
West view



corrosion potential [mV/CSE]



concrete resistivity [ohm.m]



corrosion rate [μA/cm²]

Project Name:	T6-P47/P46-NORTH-SECTION
Temperature Correction:	On
X Length:	30
Y Length:	30
X Spacing:	10
Y Spacing:	30
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	C
Corrosion Rate: Unit:	ÂµA/cmÂ²
Concrete Resistivity:	ohm.m
Corrosion Potential Unit:	mV/CSE
Rebar Diameter(x)[mm]:	8
Rebar Diameter(y)[mm]:	8
Duration Unit:	seconds
Thickness Unit:	centimeter

X	Y	Corrosion Potential	Corrosion Rate(Y)	Concrete Resist.(Y)	Duration Y	Cover Thickness(Y)	Temp	Humidity
0	0	-359	0.02	1985	6	2	15	47%
0	30	-345	0.62	554	6	2	15	51%
9	0	-381	0.40	237	6	2	15	50%
9	30	-365	1.66	211	6	2	15	49%
21	0	-375	1.13	403	6	2	15	47%
21	30	-369	1.39	382	6	2	15	47%
27	0	-368	1.26	779	6	2	15	40%
27	30	-357	1.89	403	6	2	15	41%

Project Name:	T6-P47/P46-WEST-START
Temperature Correction:	On
X Length:	70
Y Length:	30
X Spacing:	10
Y Spacing:	30
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	C
Corrosion Rate: Unit:	ÂµA/cmÂ²
Concrete Resistivity:	ohm.m
Corrosion Potential Unit:	mV/CSE
Rebar Diameter(x)[mm]:	8
Rebar Diameter(y)[mm]:	8
Duration Unit:	seconds
Thickness Unit:	centimeter

X	Y	Corrosion Potential	Corrosion Rate(Y)	Concrete Resist.(Y)	Duration Y	Cover Thickness(Y)	Temp	Humidity
0	0	-283	1.92	903	6	4	15	53%
0	30	-267	1.69	890	6	4	15	56%
11	0	-280	3.56	414	6	4	15	50%
11	30	-278	3.56	408	6	4	15	46%
21	0	-256	1.64	430	6	4	15	44%
21	30	-254	5.38	414	6	4	15	45%
33	0	-196	0.22	721	6	4	15	44%
33	30	-198	0.42	659	6	4	15	44%
43	0	-202	2.02	502	6	4	15	43%
43	30	-201	1.48	492	6	4	15	42%
53	0	-127	0.13	590	6	4	15	42%
53	30	-140	0.62	383	6	4	15	42%
67	0	-186	2.03	224	6	4	15	42%
67	30	-187	2.47	209	6	4	15	42%
111	0	-109	0.03	5952	6	4	15	42%
111	30	-111	0.01	7347	6	4	15	43%

Project Name:	T6-P47/P46-WEST-END
Temperature Correction:	On
X Length:	90
Y Length:	30
X Spacing:	10
Y Spacing:	30
Length Unit:	cm
Temperature Unit:	C
Corrosion Rate: Unit:	ÂµA/cmÂ²
Concrete Resistivity:	ohm.m
Corrosion Potential Unit:	mV/CSE
Rebar Diameter(x)[mm]:	8
Rebar Diameter(y)[mm]:	8
Duration Unit:	seconds
Thickness Unit:	centimeter

X	Y	Corrosion Potential	Corrosion Rate(Y)	Concrete Resist.(Y)	Duration Y	Cover Thickness(Y)	Temp	Humidity
0	0	-214	0.59	1680	6	2	15	45%
0	30	-244	1.22	1593	6	2	15	44%
12	0	-259	0.69	893	6	3	15	44%
12	30	-258	1.56	869	6	3	14	45%
39	0	-267	0.90	795	6	5	14	46%
39	30	-277	3.09	160	6	5	14	45%
50	0	-264	1.73	272	6	5	14	53%
50	30	-261	1.86	222	6	5	14	56%
61	0	-267	0.36	307	6	5	14	56%
61	30	-271	0.65	217	6	5	14	53%
72	0	-280	2.48	147	6	4	14	51%
72	30	-275	2.73	140	6	4	14	50%
82	0	-345	2.42	160	6	4	14	51%
82	30	-347	3.04	156	6	4	14	52%
95	0	-350	5.65	117	6	4	14	52%
95	30	-347	7.85	116	6	4	14	51%
110	0	-384	3.53	123	6	4	14	53%
110	30	-384	3.51	122	6	4	14	52%
122	0	-420	0.95	139	6	4	14	51%
122	30	-418	5.27	111	6	4	14	49%

Le travi che costituivano il viadotto presentano dei fenomeni di degrado visibili anche ad occhio nudo, come ad esempio l'espulsione del copriferro, formazione di ettringite secondaria, corrosione delle barre di armatura e dei trefoli, concentrate in particolare nelle testate di estremità delle travi ed in intradosso, per questo motivo si è scelto di focalizzare le misure in queste zone delle travi. Lateralmente l'indagine è stata svolta sulle armature a taglio poste in posizione verticale, mentre in intradosso invece sono stati analizzati i trefoli.

Dalle indagini svolte si può affermare in generale, a meno di casi particolari che:

- Superfici laterali:
    - Il potenziale di corrosione raggiunge valori più bassi all'estremità delle testate, che tendono a crescere e quindi tendono allo zero o a diventare positivi man mano che ci allontaniamo dalle testate;
    - I valori di resistività del calcestruzzo sono più bassi nelle parti più esterne delle testate e presentano un andamento crescente man mano che ci allontaniamo dalle testate;
    - La velocità sono più alti nelle parti più esterne delle testate e presentano un andamento decrescente man mano che ci allontaniamo dalle testate;
- Intradosso:
    - Il potenziale di corrosione tendenzialmente ha dei valori negativi all'intradosso, i casi peggiori si hanno nelle due testate per tutti e 4 i trefoli analizzati, invece nel corpo centrale per i 2 trefoli laterali. Inoltre si notano degli effetti localizzati dovuti dalla presenza dei fori effettuati per poter sollevare e trasportare le travi.
    - I valori di resistività del calcestruzzo tendenzialmente sono più bassi nelle due testate, si notano degli effetti localizzati dovuti dalla presenza dei fori effettuati per poter sollevare e trasportare le travi. Per il corpo centrale non può essere fatto un discorso generale, ma si valuta zona per zona a seconda dell'intensità dell'attacco ambientale in ogni zona.
    - I valori di velocità di corrosione tendenzialmente presenta dei valori più alti nelle due testate, per il corpo centrale la velocità di corrosione, in generale, è maggiore nei due trefoli laterali, ma comunque si valuta zona per zona a seconda dell'intensità dell'attacco ambientale in ogni zona. Si notano anche qui degli effetti localizzati dovuti dalla presenza dei fori effettuati per poter sollevare e trasportare le travi.

Si possono fare delle considerazioni particolari per le quattro travi illustrate precedentemente in questo capitolo. Esse erano posizionate originariamente (Fig.55) in situ nello stesso impalcato e disposte in questo modo:

- T1-P47/46 la più esterna tra le travi a doppio T e adiacente alla C1-P46/47;
- T10-P47/46 la più esterna tra le travi a doppio T (lato opposto rispetto alla T1-P47/46) e adiacente alla C2-P46/47;
- T5-P47/46 posizionata in mezzeria dell'impalcato;
- T6-P47/46 posizionata in mezzeria dell'impalcato;

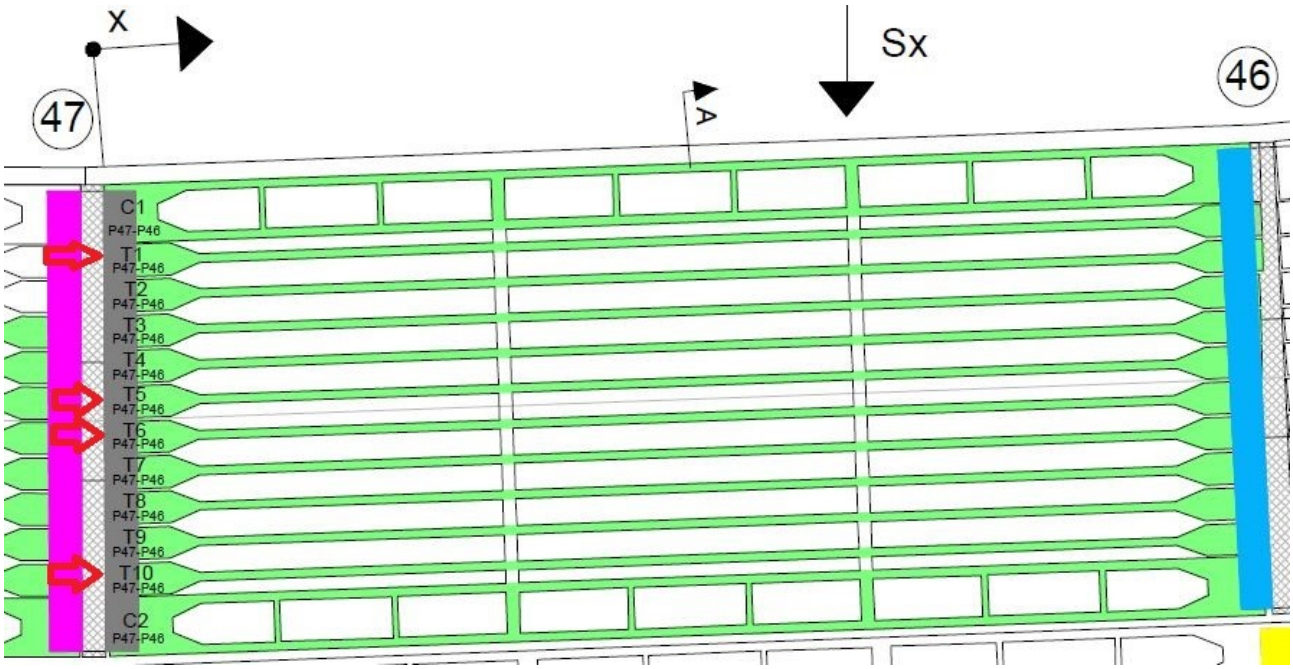


Figura 55 - pianta impalcato

Trave T1-P47/46:

Come si può notare sia dai valori misurati o come si può constatare visivamente dalle contour map, la trave T1-P47/46 risulta avere:

- Una velocità di corrosione maggiore nel lato est rispetto al lato ovest;
- Una resistività del calcestruzzo più bassa nel lato est rispetto al lato ovest;
- Un potenziale di corrosione più negativo nel lato est rispetto quello ovest;

Vengono riportati di seguito i valori mediati delle zone analizzate della trave **T1-P47/46:**

ID BEAM	Corrosion Potential [mV/CSE]	Corrosion Rate [ÂµA/cmÂ²]	Concrete Resist.(Y) [ohm.m]
T1-P47/P46-BOTTOM	-229	0,077	8533
T1-P47/P46-EAST-END	-209	2,357	1323
T1-P47/P46-EAST-START	-297	1,454	620
T1-P47/P46-WEST-END	-237	0,855	2903
T1-P47/P46-WEST-START	-198,6	0,551	1932
T1-P47/P46-NORTH-SECTION	-244	0,556	1523

I risultati ottenuti trovano riscontro con lo stato di degrado della trave. Si noti (Fig. 56-57) come la trave **T1-P47/46** nella zona **est inizio**, presenti evidenti segni di degrado strutturale e delaminazione, in particolare si può notare nella rispettiva contour map, il passaggio da una zona rossa in corrispondenza della zona dove è stato espulso il copriferro ad una zona gialla e verde allontanandosi dalla parte maggiormente degradata. In tale zona si riscontrano valori minimi di **potenziale di corrosione** pari a **-416 [mV/CSE]**, valori massimi di **velocità di corrosione** pari a **9,02 [ÂµA/cmÂ²]** e valori minimi di **resistività del calcestruzzo** pari a **156 [ohm.m]**

Figura 56 – EST INIZIO TRAVE T1-P47/46

Figura 57 - SEZIONE SUD TRAVE T1-P47/46

Nella zona **ovest fine** la trave **T1-P47/46** presenti evidenti segni di degrado strutturale e delaminazione, in particolare si può notare nella rispettiva contour map, il passaggio da una zona rossa in corrispondenza delle fessure ad una zona gialla e verde allontanandosi dalla parte maggiormente degradata. In tale zona si riscontrano valori minimi di **potenziale di corrosione** pari a **-334 [mV/CSE]**, valori massimi di **velocità di corrosione** pari a **4.71 [ÂµA/cmÂ²]** e valori minimi di **resistività del calcestruzzo** pari a **277 [ohm.m]**

È molto probabile che il degrado del lato est sia più accentuato rispetto al lato ovest, per il contatto del lato est (in situ) della trave T1-P47/46 con il lato est (in situ) della trave C1-P46/47 Fig.(58) risultando il lato più esterno e quindi maggiormente esposto.

Figura 58 - Trave C1-P46/47

La trave C1-P46/47 presenta un sistema di raccolta delle acque piovane, i danni causati in questa trave sono dovuti, in buona parte, ad alcune carenze delle tubazioni in plastica e quindi infiltrazione di acqua piovana e di sali disgelanti per alcuni mesi all'anno. Non è dunque da escludere l'ipotesi che nella posizione originaria, il contatto tra le due travi T1-P47/46 e C1-P46/47 abbia causato un degrado più accentuato nel lato est rispetto al lavo ovest (sistema di riferimento in situ).

Trave T10-P47/46:

Come si può notare sia dai valori misurati o come si può constatare più facilmente dalle contour map, la trave T10-P47/46 risulta avere:

- Una velocità di corrosione maggiore nel lato ovest rispetto al lato est
- Una resistività del calcestruzzo più bassa nel lato ovest rispetto al lato est
- Un potenziale di corrosione più negativo nel lato ovest rispetto quello est

Vengono riportati di seguito i valori mediati delle zone analizzate della trave **T10-P47/46:**

ID BEAM	Corrosion Potential	Corrosion Rate(Y)	Concrete Resist.(Y)
T10-P47/P46-BOTTOM	-264	0,084	12204
T10-P47/P46-EAST-END	-205	0,579	2719
T10-P47/P46-EAST-START	-224	0,082	4884
T10-P47/P46-WEST-END	-269	1,667	787
T10-P47/P46-WEST-START	-259	2,057	1554
T10-P47/P46-NORTH-SECTION	-340	0,664	853

I risultati ottenuti trovano riscontro con lo stato di degrado della trave. Si noti (Fig. 59) come la trave **T10-P47/46** nella zona **intradosso**, presenti evidenti segni di degrado strutturale e corrosione, dovuti ad uno spessore di copriferro inadeguato ed in alcuni punti quasi inesistente, in particolare si può notare nella rispettiva contour map, il passaggio da una zona rossa in corrispondenza della zona dove è stato espulso il copriferro ad una zona gialla e verde allontanandosi dalla parte maggiormente degradata. Nell'intradosso si riscontrano valori minimi di **potenziale di corrosione** pari a **-427 [mV/CSE]**, valori massimi di **velocità di corrosione** pari a **2.1 [ÂµA/cmÂ²]** e valori minimi di **resistività del calcestruzzo** pari a **433[ohm.m]**

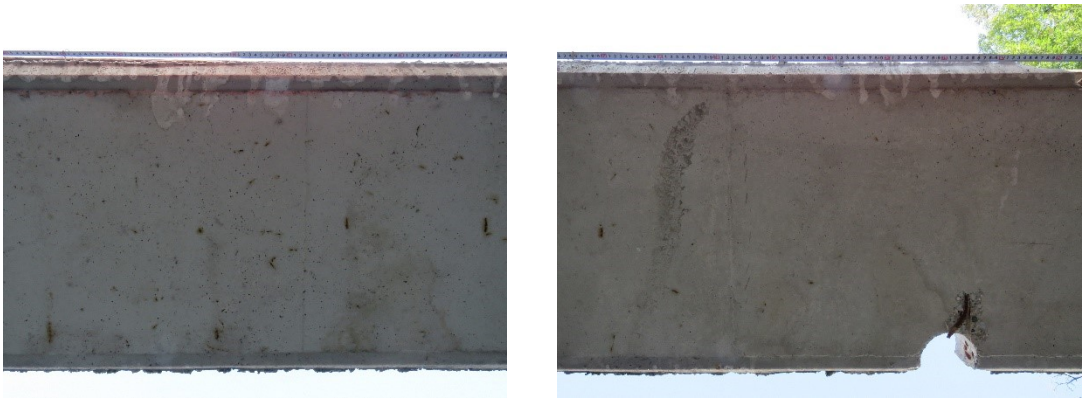


Figura 59- Intradosso parte centrale Trave T10-P47/46

Anche qui, come per la trave T1-P47/46, è molto probabile che il degrado del lato ovest sia più accentuato rispetto al lato est, per il contatto del lato ovest (in situ) della trave T10-P47/46 con il lato ovest (in situ) della trave C2-P46/47.

Le superfici laterali della trave T10 appartengono ad una trave esterna dell'impalcato, ma comunque non esposta come la trave T1 all'esterno, poiché affiancata dal secondo impalcato, questo

spiegherebbe perché la trave T1 risulta avere fenomeni di degrado più accentuati rispetto la trave T10.

Trave T5-P47/46:

I risultati ottenuti trovano riscontro con lo stato di degrado della trave. Si noti (Fig. 60-61) come la trave **T5-P47/46** nella zona **intradosso** e lungo la superficie **laterale**, presenti evidenti segni di corrosione, fessurazione e delaminazione, dovuti anche ad uno spessore di copriferro inadeguato ed in alcuni punti quasi inesistente, in particolare si può notare nella rispettiva contour map, il passaggio da una zona rossa in corrispondenza della zona dove è stato espulso il copriferro in intradosso e della zona fessurata lungo le superfici laterali, ad una zona gialla e verde allontanandosi dalla parte maggiormente degradata. Nell'intradosso si riscontrano valori minimi di **potenziale di corrosione** pari a **-424 [mV/CSE]**, valori massimi di **velocità di corrosione** pari a **0.43 [ÂµA/cmÂ²]** e valori minimi di **resistività del calcestruzzo** pari a **202 [ohm.m].**

Nella superficie laterale est si riscontrano valori minimi di **potenziale di corrosione** pari a **-279[mV/CSE]**, valori massimi di **velocità di corrosione** pari a **18.66 [ÂµA/cmÂ²]** e valori minimi di **resistività del calcestruzzo** pari a **51 [ohm.m].**

Nella superficie laterale ovest si riscontrano valori minimi di **potenziale di corrosione** pari a **-308 [mV/CSE]**, valori massimi di **velocità di corrosione** pari a **17.87 [ÂµA/cmÂ²]** e valori minimi di **resistività del calcestruzzo** pari a **58 [ohm.m].**

Vengono riportati di seguito i valori mediati delle zone analizzate della trave **T5-P47/46:**

ID BEAM	Corrosion Potential	Corrosion Rate(Y)	Concrete Resist.(Y)
T5-P47/P46- BOTTOM	-237	0,055	13971
T5-P47/P46-EAST-END	-216	1,206	8765
T5-P47/P46-EAST-START	-179	4,831	402
T5-P47/P46-WEST-END	-164	4,177	2739
T5-P47/P46-WEST-START	-205	2,246	534
T5-P47/P46-NORTH-SECTION	-317	1,220	480

Figura 60 - INTRADOSSO LATO SUD TRAVE T5-P47/46

Figura 61 – SUPERFICIE LATERALE OVEST INIZIO TRAVE T5-P47/46

Trave T6-P47/46: nord sud

I risultati ottenuti trovano riscontro con lo stato di degrado della trave. Si noti (Fig. 62-63-64) come la trave **T6-P47/46** nella zona **intradosso** e lungo la superficie **laterale**, presenti evidenti segni di corrosione, fessurazione e delaminazione, dovuti anche ad uno spessore di copriferro inadeguato ed in alcuni punti quasi inesistente, in particolare si può notare nella rispettiva contour map, il passaggio da una zona rossa in corrispondenza della zona dove è stato espulso il copriferro in intradosso e della zona fessurata lungo le superfici laterali, ad una zona gialla e verde allontanandosi dalla parte maggiormente degradata. Nell'intradosso si riscontrano valori minimi di **potenziale di corrosione** pari a **-329 [mV/CSE]**, valori massimi di **velocità di corrosione** pari a **1.12 [ÂµA/cmÂ²]** e valori minimi di **resistività del calcestruzzo** pari a **291 [ohm.m].**

Nella superficie laterale est si riscontrano valori minimi di **potenziale di corrosione** pari a **-398[mV/CSE]**, valori massimi di **velocità di corrosione** pari a **8.71 [ÂµA/cmÂ²]** e valori minimi di **resistività del calcestruzzo** pari a **115 [ohm.m].**

Nella superficie laterale ovest si riscontrano valori minimi di **potenziale di corrosione** pari a **-420 [mV/CSE]**, valori massimi di **velocità di corrosione** pari a **7.85 [ÂµA/cmÂ²]** e valori minimi di **resistività del calcestruzzo** pari a **111 [ohm.m].**

Vengono riportati di seguito i valori mediati delle zone analizzate della **Trave T6-P47/46:**

ID BEAM	Corrosion Potential	Corrosion Rate(Y)	Concrete Resist.(Y)
T6-P47/P46-BOTT0M	-116	0,071	16016
T6-P47/P46-EAST-END	-213	0,746	1209
T6-P47/P46-EAST-START	-317	3,033	721
T6-P47/P46-WEST-END	-307	2,504	417
T6-P47/P46-WEST-START	-218	1,939	517
T6-P47/P46-NORTH-SECTION	-365	1,046	619
T6-P47/P46-SUD-SECTION	-167	0,589	845

Figura 62 – INTRADOSSO LATO SUD TRAVE T6-P47/46

Figura 63 - SUPERFICIE LATERALE EST INIZIO TRAVE T6-P47/46

Figura 64 - SUPERFICIE LATERALE OVEST FINE TRAVE T6-P47/46

5 CONCLUSIONI

Nel presente lavoro di tesi è stato analizzato il problema del degrado strutturale su travi a doppio T precompresse che costituivano il viadotto di Corso Grosseto a Torino, con il fine d'identificare lo stato di conservazione della struttura alla fine della vita utile.

Il degrado strutturale è un tema attuale poiché la maggior parte dei ponti che sono stati realizzati nel secolo scorso, sta raggiungendo la fine della vita utile. Durante quegli anni il concetto di durabilità di un'opera non aveva raggiunto i livelli odierni, infatti si pensava che le strutture in cemento armato potessero persistere a lungo nel tempo.

Ed è proprio con il passare del tempo che ci rendiamo conto che le strutture in cemento armato non sono eterne, ma con tutti i relativi accorgimenti, sono strutture soggette al degrado dei materiali che li costituiscono, in generale è possibile associare i vari fattori del degrado a meccanismi di tipo: chimici, fisici e meccanici.

Uno dei meccanismi che riduce notevolmente la vita utile di una struttura in c.a. è la corrosione. Tale meccanismo causa la riduzione della sezione delle barre di armatura, l'espulsione del copriferro e quindi la perdita delle capacità per la quale le strutture sono state progettate, comportando un aumento dei costi di manutenzione, la dismissione prematura della struttura ed in alcuni casi il collasso della struttura. È dunque necessario definire delle tecniche utili a rilevare il degrado e ridurre i suoi effetti.

Lo stato di degrado è stato valutato inizialmente mediante ispezioni visive, attraverso cui è stata effettuata la mappatura del quadro fessurativo e delle aree delaminate; successivamente si è valutata la condizione delle armature dal punto di vista della corrosione.

Il metodo applicato riguarda la misura di potenziale, resistività e velocità di corrosione, al fine di definire la condizione delle barre di armatura dal punto di vista della corrosione. Il metodo adottato è risultato efficace per la velocità di applicazione e per la natura non distruttiva della prova.

I risultati ottenuti hanno evidenziato quelle che sono le principali vulnerabilità che affliggono la maggior parte dei ponti in condizione di degrado strutturale: inefficace sistema di regimentazione delle acque, utilizzo di sali disgelanti, inadeguata valutazione nei confronti della durabilità dell'opera.

I risultati ottenuti costituiscono un'importante base di partenza per sviluppi futuri che consentiranno di correlare potenziale, velocità e resistività con le reali condizioni delle armature e quindi con l'eventuale riduzione di sezione. In tal modo, si potrà risalire alle effettive condizioni delle armature senza la necessità di rimuovere il copriferro.

Bibliografia

[1] https://blog.tradimalt.com/cemento-2/

[2] https://it.wikipedia.org/wiki/Cemento

[3] Felitti, Matteo, and Lucia Rosaria Mecca. Il Degrado Delle Strutture in Calcestruzzo Armato Diagnosi, Monitoraggio E Soluzioni per Il Recupero. Santarcangelo Di Romagna: Maggioli, 2018.

[4] Alunno Rossetti, Vito. Il Calcestruzzo Materiali E Tecnologia. 3.rd ed. Milano: McGraw-Hill, 2007.

[5] Bossio, Antonio. Corrosione E Diagnostica Delle Strutture in Calcestruzzo Armato Criteri Di Intervento E Di Ripristino Conservativo. Assago: Wolters Kluwer, 2014.

[6] Pedeferri, Pietro. Corrosion Science and Engineering. Cham: Springer International, 2018.

[7] Pedeferri P., Bertolini L., La durabilità nel calcestruzzo armato, McGraw-Hill, 2000.

[8] Pedeferri P., Corrosione e protezione dei materiali metallici, Vol I-II, Polipress, 2012.

[9] Bagatti, Corradi, Desco, Ropa, Chimica, Zanichelli Editore, 2012.

[10] Tuutti K., “Corrosion of steel in concrete”, Swedish cement and concrete institute (CIB), No: 4-82, Stockholm, 1982.

[11] “Manuale sulla corrosione”, Hilti, Ottobre 2015

[12] “Il degrado del calcestruzzo”, Mapei

[13] Collepardi, M. "A State-of-the-art Review on Delayed Ettringite Attack on Concrete." Cement & Concrete Composites 25.4-5 (2003)

[14] L. Coppola, "La Diagnosi del Degrado delle Strutture in Calcestruzzo", L'Industria Italiana del Cemento, 681, pp. 657-666, Roma (1993).

[15] Pucinotti, Raffaele. Patologia E Diagnostica Del Cemento Armato. Palermo: Flaccovio, 2006.

[16] Collepardi, Mario, and Silvia Troli. Il Nuovo Calcestruzzo. 5.th ed. Villorba (TV): Tintoretto, 2009.

[17] Collepardi, Mario, J. Jacob Ogoumah Olagot, Francesca Simonelli, and Roberto Troli. Il Calcestruzzo Vulnerabile Prevenzione, Diagnosi Del Degrado E Restauro. Villorba: Tintoretto, 2005.

[18] Gowers, K. and Steve Millard. “Measurement of concrete resistivity for assessment of corrosion severity of steel using wenner technique.” Materials 96 (1999): 536-541.

[19] Polder, R, Andrade, C, Elsener, B, Vennesland, Ø, Gulikers, J, Weidert, R, and Raupach, M. "Test Methods for on Site Measurement of Resistivity of Concrete." Materials and Structures 33.10 (2000): 603-11.

[20] Andrade, C., Alonso, C. Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. Mat. Struct. 37, 623–643 (2004).

[21] Giatec iCOR® UserManual

[22] ASTM C876. 09. Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete, Annual Book of ASTM Standards.

[23] RILEM TC 154-EMC. 2003. Half-cell potential measurements- Potential mapping on reinforced, Concrete Structures, Materials and Structures. 36, 461-471.