Politecnico di Torino

Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

A.a. 2020/2021

Sessione di Laurea Luglio 2021

Analisi dello stato di conservazione delle strutture in ferrocemento dell'Ing. Pierluigi Nervi

I padiglioni B e C di Torino Esposizioni

Relatore:

Prof. Ing. Francesco Tondolo

Candidato:

Paolo Guarino

Sommario

1. Introduzione 5

2. La storia dei padiglioni 6

2.1 Padiglione B 9

2.2 Padiglione C 16

2.3 Padiglioni ai giorni nostri 20

3. Il Ferrocemento nel mondo 22

3.1 Il ferrocemento 22

3.2 Comportamento tipico 25

3.3 Serbatoi 27

3.4 Barche 30

3.5 Edifici 33

3.6 Cupole e grandi opere 38

4. Prove in situ padiglione C 47

4.1 Carotaggi 48

4.2 Misura potenziale di corrosione 51

4.3 Risultati ICOR 58

4.4 Osservazioni sui risultati ottenuti 102

4.5 Confronto 102

5. Prove padiglione B 105

5.1 Pilastro P4 107

5.2 Pilastro P7 109

5.3 Pilastro P13 111

6. Scelta del Mockup 114

6.1 Trave ondulata del solaio perimetrale 114

6.2 Realizzazione pratica 119

7. Analisi dei materiali da costruzione 123

7.1 Demolizione del campione in laboratorio 123

7.2 Analisi della malta 127

7.3 Scelta delle barre di armatura 130

7.4 Progettazione cassero 132

8. Conclusioni e sviluppi futuri 135

Bibliografia 137

1. Introduzione

Il patrimonio architettonico italiano è ricco di edifici e opere che appartengono a diversi periodi storici e spesso la priorità diventa quella di programmare la corretta manutenzione delle stesse piuttosto che concentrarsi sulla realizzazione di nuove costruzioni. La pianificazione della manutenzione si articola in diverse fasi, comprendendo lo studio e valutazione dell'opera, l'analisi della normativa vigente all'epoca della costruzione e la progettazione di test per la valutazione dello stato di conservazione attuale.

Il presente lavoro di tesi rientra in un progetto, finanziato da *Getty Foundation,* con il fine di preservare le opere esistenti dell'Ing. Pierluigi Nervi, il quale nelle sue strutture si è distinto per lo studio di brevetti su nuove metodologie costruttive e ottimizzazione dei materiali. Nel presente lavoro verrà posto l'accento sullo stato di conservazione degli elementi e delle strutture realizzate in ferrocemento, materiale brevettato proprio dall'ingegnere italiano.

Nell'elaborato sono state analizzate le diverse strutture presenti nel mondo che hanno utilizzato in parte o integralmente il ferrocemento come materiale da costruzione, è stata ripercorsa la storia e le fasi costruttive dei padiglioni B e C di Torino Esposizioni, ed è stata illustrata la campagna prove nei due padiglioni per la valutazione degli effetti del degrado strutturale utilizzando metodologie di analisi non distruttive.

Infine, è stato presentato il progetto per la realizzazione in scala 1:1 di quattro Mockup in ferrocemento, riproducente una trave ondulata del solaio perimetrale del padiglione C di Torino Esposizioni. A tal fine, dopo un attento studio dei documenti di archivio, risalenti all'epoca della costruzione, sono stati valutati e acquistati materiali con caratteristiche geometriche e meccaniche il più possibile simili a quelle utilizzate nel 1949. In ultimo è stato progettato un cassero di materiale ligneo sagomato opportunamente, per il getto di elementi conformi alle geometrie originali.

L'obiettivo futuro è lo studio del comportamento dei mockup, dopo aver indotto artificialmente lo stato di degrado per corrosione delle armature in acciaio.

Figura 1 :Vista interna abside padiglione B

2. La storia dei padiglioni

Il primo nucleo del padiglione di Torino esposizioni, nasce nel 1936, da Ettore Sottsass, per ospitare il Palazzo della Moda. Il complesso è situato nella magnifica cornice del Parco del Valentino. L'edificio nato per tutt'altri nobili scopi venne utilizzato come armeria durante la guerra e quindi gravemente danneggiato dai bombardamenti.

Finita la guerra, la società Torino Esposizioni commissiona la ricostruzione di un nuovo salone per le esposizioni, per essere principalmente adibito come showroom per l'industria automobilistica.

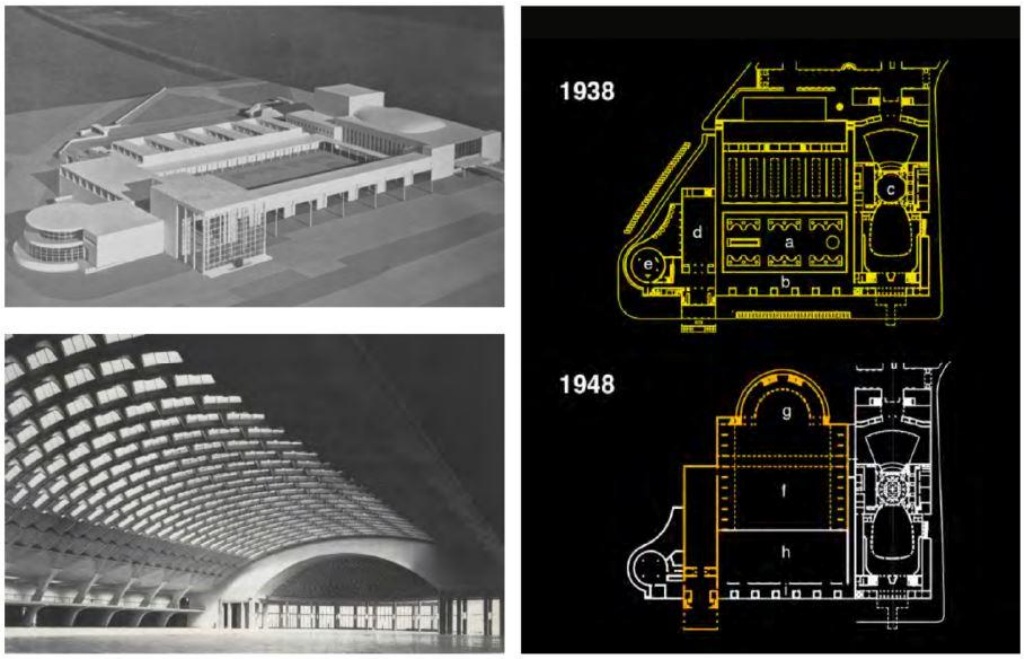


Figura 2: Costruzione della Hall B sui resti del Palazzo della Moda

È nel 1947 che il progetto dei padiglioni centrali passa tra le mani di Pierluigi Nervi, il quale progetta e realizza il padiglione B affiancandola a ciò che rimaneva della struttura del Palazzo della Moda. [1]

Successivamente, nel 1949, venne chiesto all'ingegner Nervi di costruire un nuovo padiglione, più piccolo, il padiglione C; e nel 1954, il padiglione B venne ampliato.

In questi due progetti e realizzazioni, Nervi diede piena dimostrazione di abilità nell'unire l'ispirazione, la bellezza e la tecnica, proponendo nuovi metodi di costruzione e utilizzo della prefabbricazione unici nel suo genere.

Pierluigi Nervi fece largo uso di elementi modulari in ferrocemento, utilizzati come casseri a perdere per dare forma a delle volte articolate.

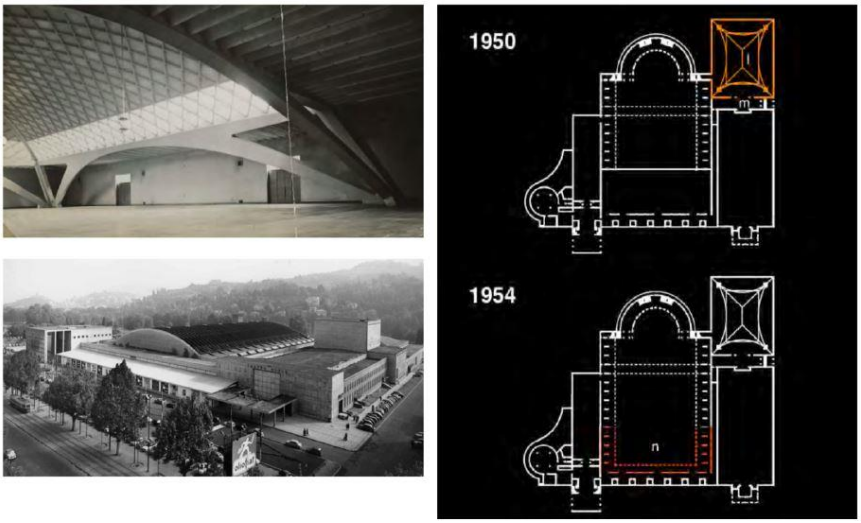


Figura 3: Ampliamento Padiglione B e costruzione del Padiglione C

Il padiglione B fu utilizzato prevalentemente come polo centrale per le fiere espositive dell'epoca. Ospitò le fiere dell'automobile, dove i colossi italiani come la Fiat presentavano al pubblico le ultime novità sul mondo delle 4 ruote; la seconda fiera delle arti Sanitarie nel '54 dove si esponeva a tutto il mondo scientifico i progressi della tecnica raggiunti in apparecchiature ad uso sanitario; oppure la fiera dell'innovazione tessile e il salone internazionale della tecnica.

La bellezza e maestosità di questo padiglione fu scenario anche di una celebre scena del film "The Italian Job" nel '69, con un inseguimento tra automobili a ritmo di musica sublime nella cornice della volta in ferrocemento caratteristica del padiglione. [1]

Figura 4: Scena Tratta dal film The Italian Job

Successivamente le fiere sono state spostate nei centri espositivi di Lingotto, mentre i padiglioni di Torino Esposizioni hanno progressivamente cambiato

destinazione d'uso, diventando polo universitario data la vicinanza con la sede di Architettura del Castello del Valentino oppure come palaghiaccio nel 2006 in occasione delle Olimpiadi invernali di Torino.

2.1 Padiglione B

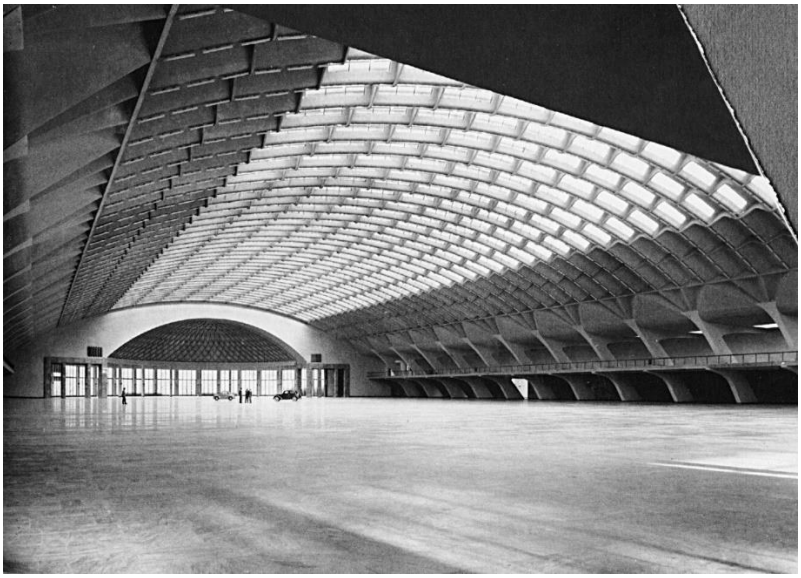


Figura 5 : Foto interno Padiglione B

Dal punto di vista strutturale, il padiglione B è composto da due zone:

- il **salone espositivo**, di pianta rettangolare con larghezza di 95.10 metri e lunghezza di 111.5 metri, coperto da una volta a botte formata da elementi corrugati in ferro cemento;
- **la zona absidale**, formata da una semi cupola di diametro di 40 metri, composta da tavelloni romboidali prefabbricati in ferrocemento, circondata da un solaio semicircolare con funzione di diaframma orizzontale per contrastare le reazioni orizzontali.

La volta a botte è ottenuta accostando degli elementi in ferrocemento prefabbricati, larghi 2.50 m e alti 1.45 m in chiave, con uno spessore piccolissimo di 5 cm. Ogni elemento corrugato è lungo 4.5 m e ha due diaframmi alle estremità che garantiscono la stabilità di forma dell'elemento singolo.

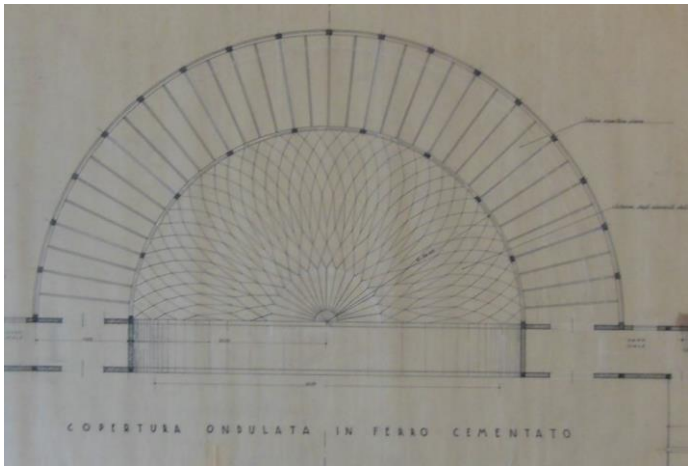


Figura 6 : Disegno originale della zona absidale

Il padiglione poggia principalmente sul terreno, tranne la zona absidale e gli ultimi 30 m del salone principale, che dispongono di un piano interrato.

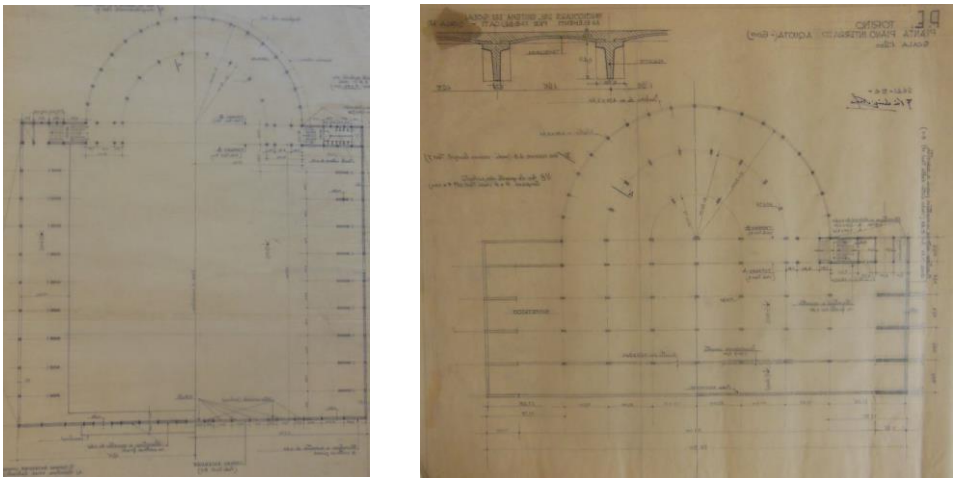


Figura 7 : Disegni originali piano interrato e piano terra

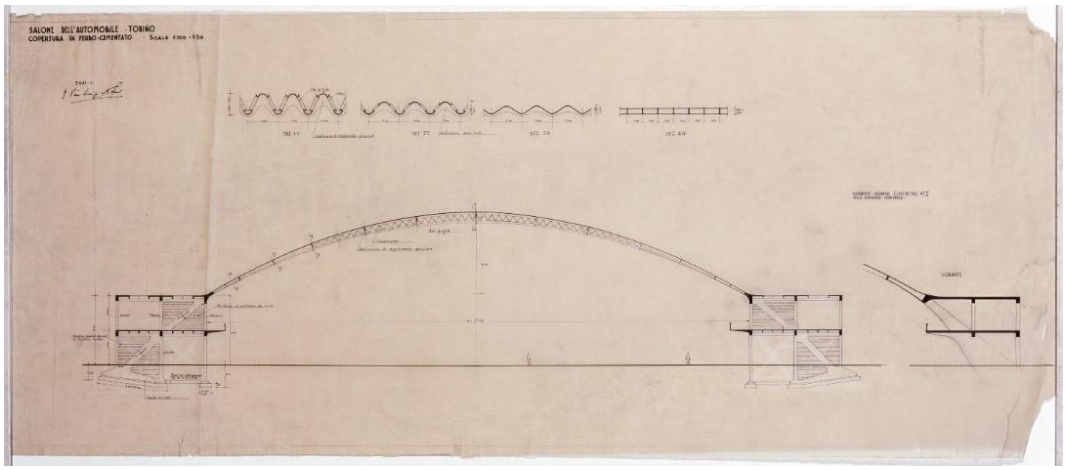


Figura 8 : Disegno originale copertura Hall B

Gli elementi corrugati una volta sollevati e posizionati su una centina venivano resi solidali grazie a dei getti in calcestruzzo armato, in chiave e nel cavo dell'onda, schematizzato in Figura 9. [1]

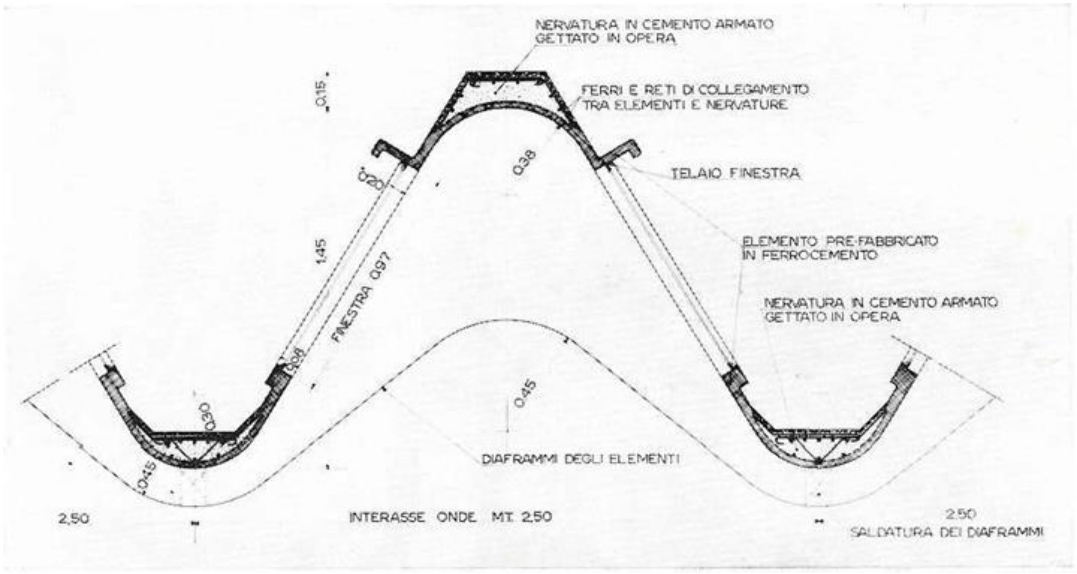


Figura 9 : Sezione dell'elemento in ferrocemento completato con il getto in calcestruzzo

Figura 10 : Deposito elementi prefabbricati ai piedi della struttura

Figura 11 : Posizionamento dei ferri per getto nervature

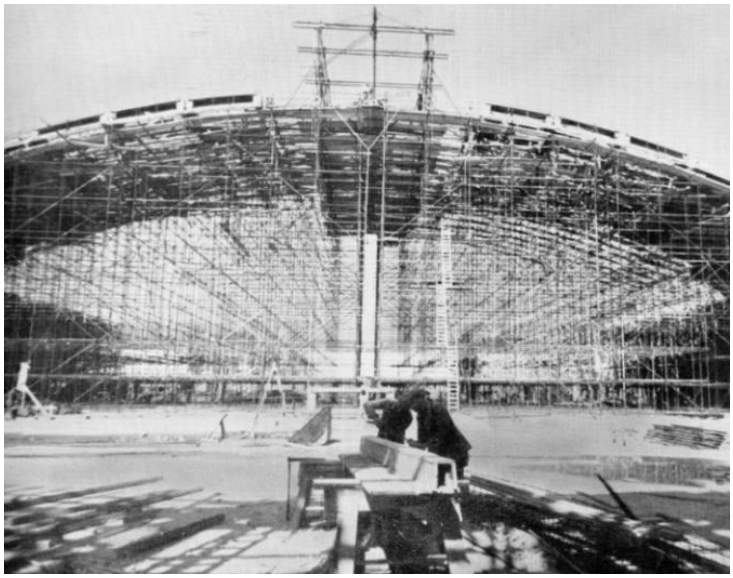


Figura 12 : Foto posizionamento impalcature per assemblaggio della copertura

Gli elementi ondulati della copertura sono raccolti in gruppi da tre da elementi di raccordo a ventaglio che scaricano su dei contrafforti inclinati che a loro volta sorreggono le balconate laterali.

Gli elementi a ventaglio sono un altro elemento prefabbricato in ferrocemento.

Ogni ventaglio raggruppa tre conci d'onda facendoli poi convergere in un pilastro gettato in opera. Le tre onde sono unite posizionando barre e reti metalliche, completando con un getto di calcestruzzo. [2]

La sezione del ventaglio è variabile e decrescente verso l'imposta.

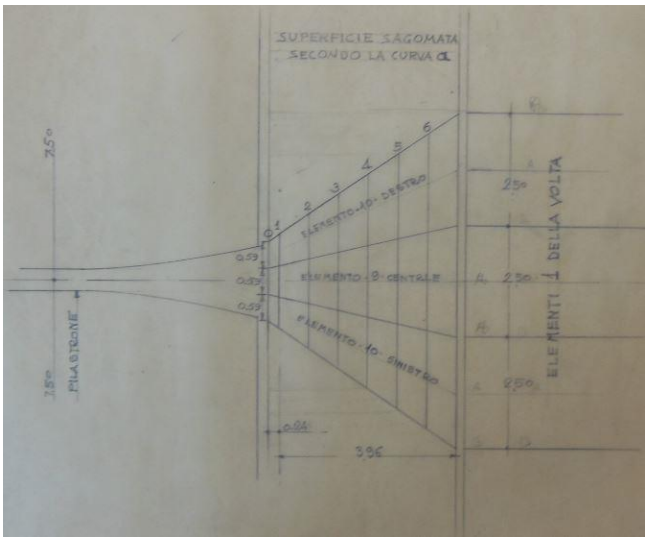


Figura 13 : Schema in pianta dei ventagli

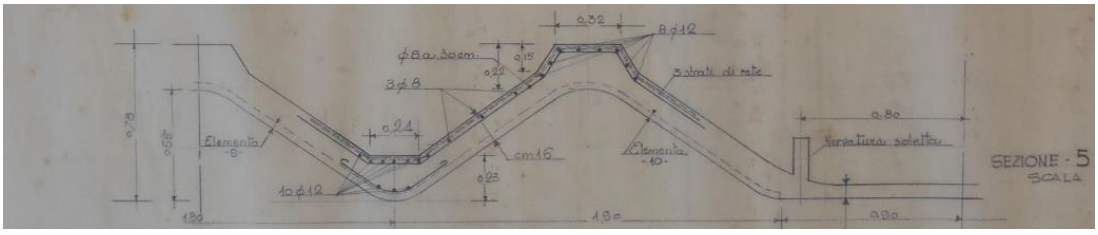


Figura 14 : Sezione di un ventaglio

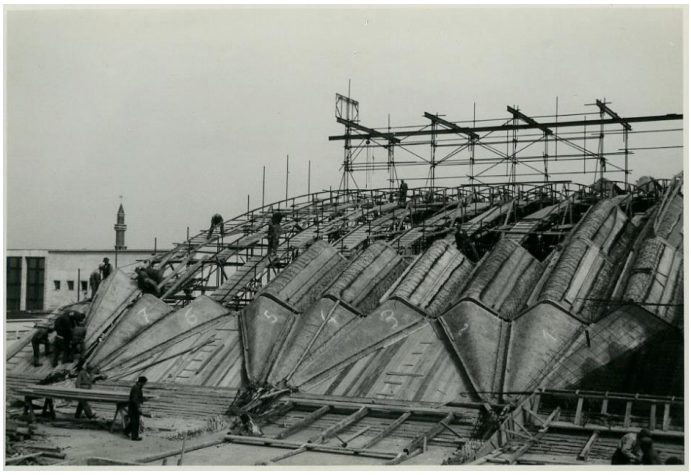


Figura 15 : Raccolta a tre a tre degli elementi corrugati su contrafforti

Figura 16 : Fotografia interna dei grossi pilastri inclinati che sorreggono copertura e balconate

In Figura 17 è possibile osservare la sezione laterale del pilastro che sorregge la copertura e le balconate; il disegno comprende anche la disposizione delle armature nei vari elementi. Le balconate sono composte da travi prefabbricate a sezione variabile, completate da una soletta gettata in opera di 10 cm.

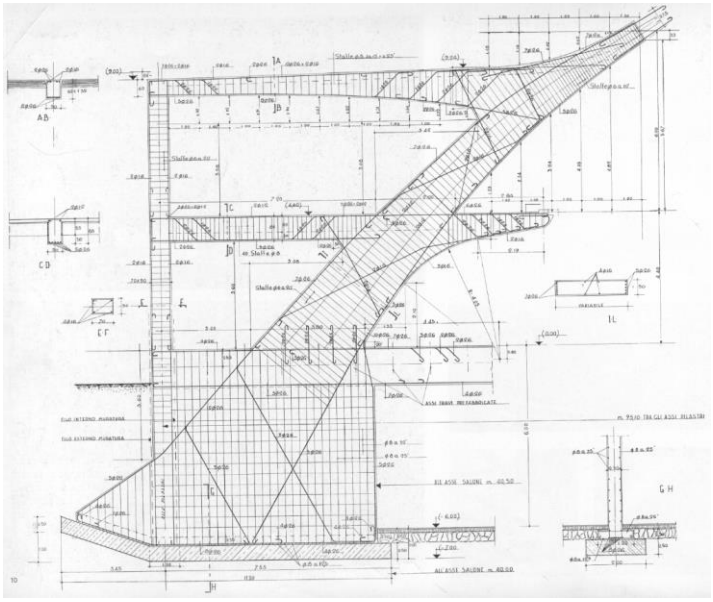


Figura 17 : Disegno originale della sezione del pilastro che sorregge la copertura e balconate

Oltre alla copertura con elementi corrugati e agli elementi a ventaglio, Nervi ha dato largo spazio all'utilizzo del ferrocemento nella realizzazione della semi cupola dell'abside.

Il ferrocemento è stato utilizzato per la realizzazione di elementi romboidali spessi 2 cm, disposti in modo tale da essere completati da getti in calcestruzzo per le nervature ed una soletta di completamento. Lo spessore complessivo della cupola risulta quindi di 29 cm. [2]

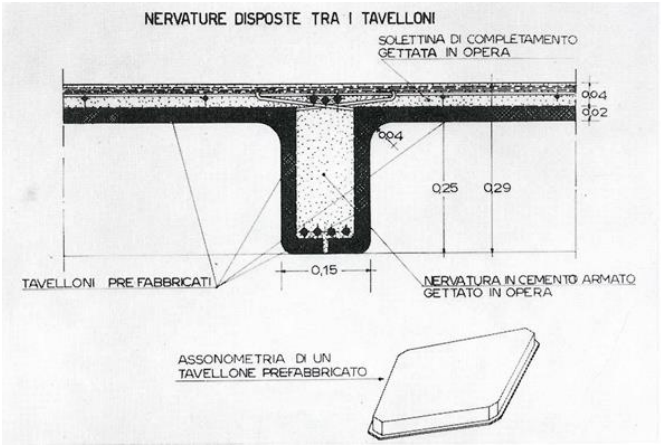


Figura 18 : Sezione cupola più assonometria elementi in ferrocemento

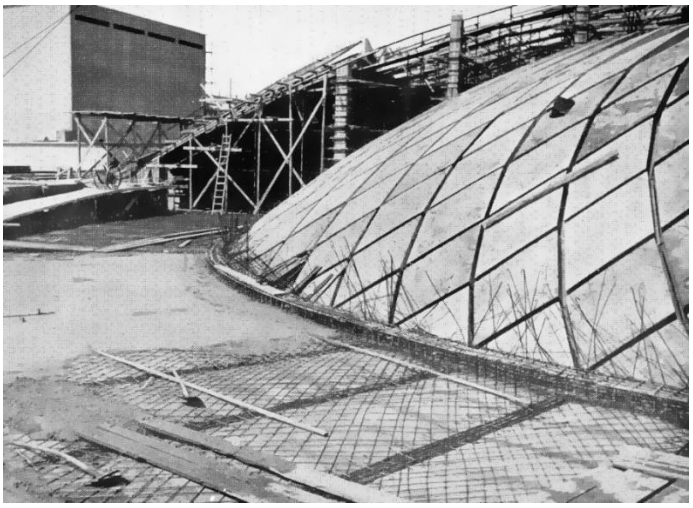


Figura 19 : Fotografia Semi cupola durante la realizzazione

2.2 Padiglione C

Il padiglione C è stato costruito tra il 1949 e il 1950.

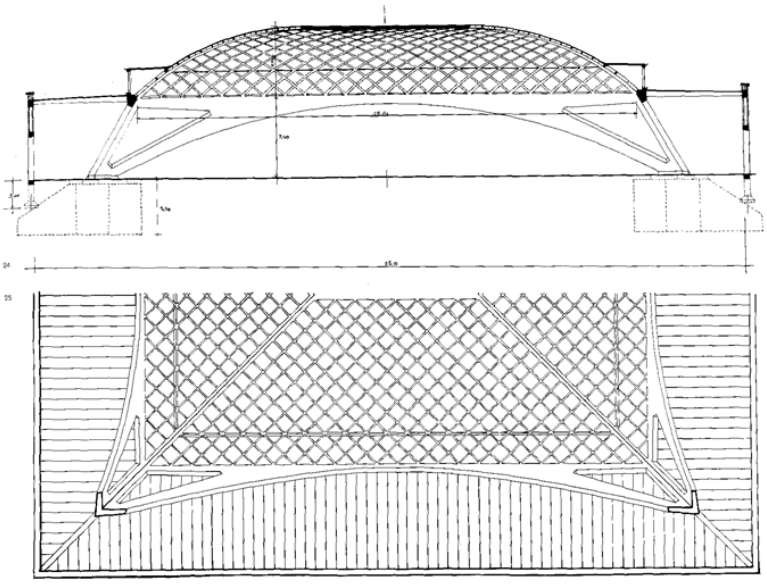


Figura 20 : Sezione copertura con arco ribassato, più sezione vista dall'alto

Il salone si sviluppa su una lunghezza di 65 m e una larghezza di 50 m, è coperto da una volta a padiglione sorretta da 4 archi ribassati e disposti su piani inclinati. L'inclinazione degli archi nasce per resistere alla risultante dei carichi proveniente dalla copertura e quella del peso proprio del solaio perimetrale.

Le tipologie di archi presenti sono due: l'arco lungo, che copre una luce di 56 metri, e l'arco corto, che copre una luce di 34 metri.

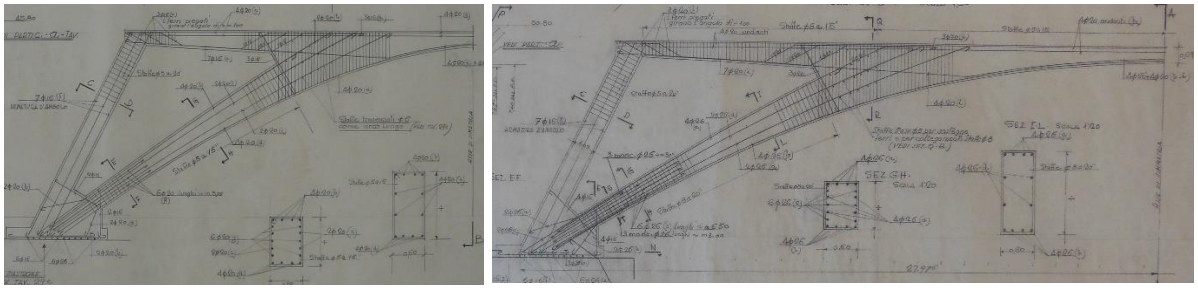


Figura 21 : Disegno originale armature Arco Corto (sinistra) e Arco Lungo (destra)

Entrambi gli archi sono stati realizzati in tre fasi di getto differenti, utilizzando anche tipologie di cemento differente, il tipo 500 per la fondazione e il pilastro d'angolo, mentre il tipo 680 per il telaio dell'arco e la trave di imposta, come rappresentato nella figura successiva. [3]

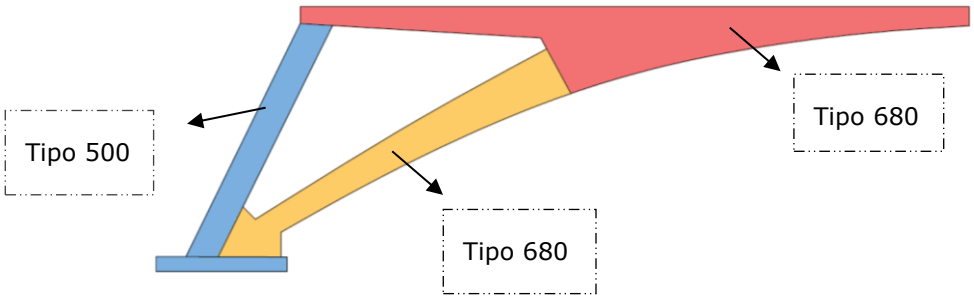


Figura 22 : Schematizzazione getti di conglomerato cementizio

La tecnica costruttiva per la copertura del padiglione C è analoga a quella del padiglione B, costituita da tavelloni in ferrocemento, disposti su centine e poi completati da getti di calcestruzzo in opera, per la realizzazione delle tipiche nervature.

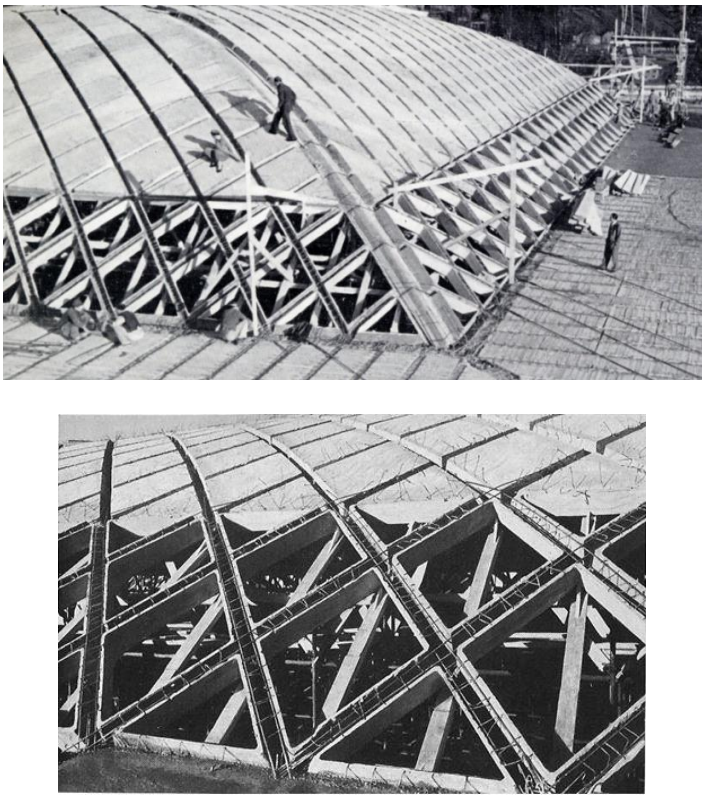


Figura 23 : Fase di assemblaggio tavelloni sulla volta prima del getto delle nervature

I tavelloni per la costruzione della copertura sono stati realizzati utilizzando degli stampi rigidi, su cui veniva steso uno strato di malta cementizia, dopodiché veniva posizionata la gabbia composta da reti di armatura e barre di armatura di piccolo diametro. Infine, il tutto veniva ricoperto opportunamente con malta molto plastica e stoccato insieme agli altri pezzi precedentemente realizzati con la stessa metodologia. [3]

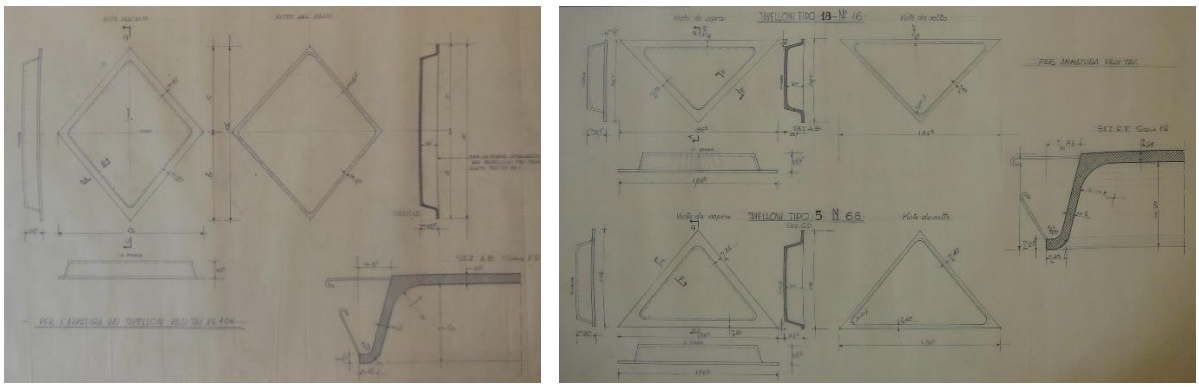


Figura 24 : Casseforme per i tavelloni

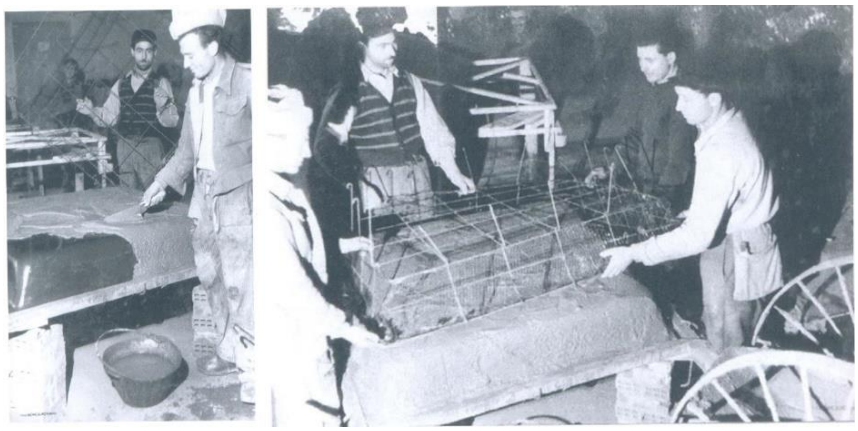


Figura 25 : Realizzazione pratica tavellone di copertura

Il solaio perimetrale invece è stato realizzato con travi sottili ondulate in ferrocemento, con un interasse in direzione trasversale di 94 cm, sezione maggiore all'incastro con la trave interna e sezione minore verso il muro perimetrale; il tutto è completato da una soletta gettata in opera di 4 centimetri di spessore.

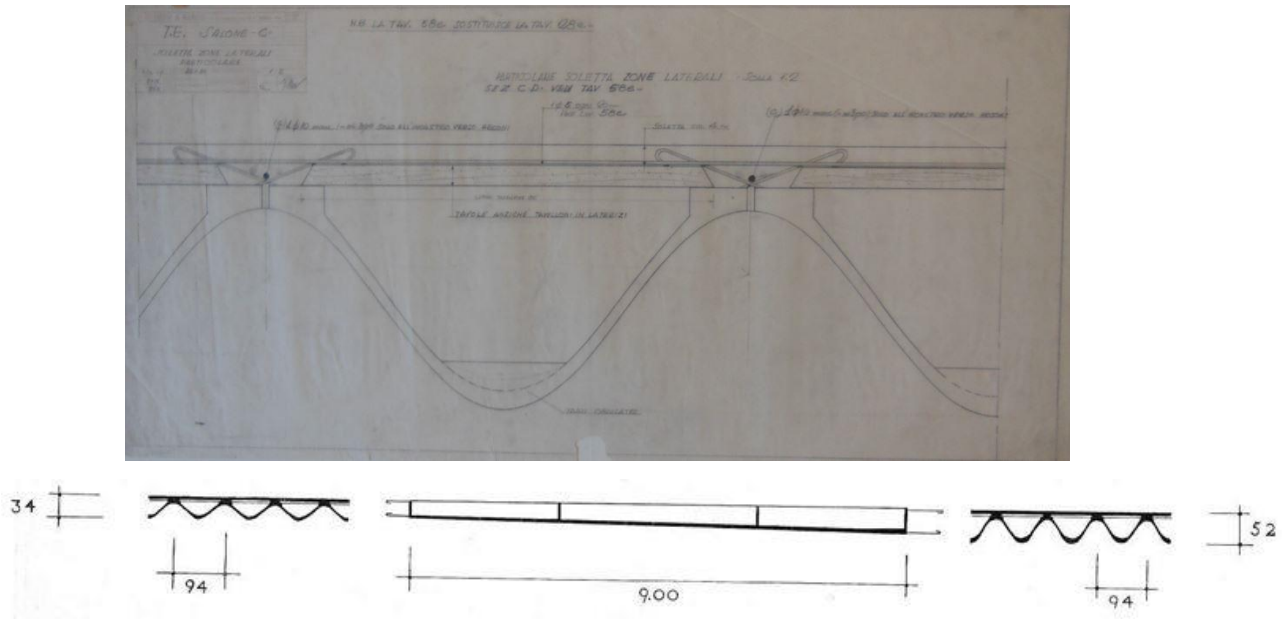


Figura 26 : Sezione solaio perimetrale in ferrocemento

2.3 Padiglioni ai giorni nostri

Attualmente i padiglioni sono principalmente in disuso, il più recente utilizzo è stato il festival di arte contemporanea "Paratissima" dal 2014.

Negli anni, il padiglione B è stato soggetto ad alcuni interventi di modernizzazione e restauro: è stato completamente riverniciato passando da un color panna ad un bianco puro, è stato installato un impianto di ventilazione che vede l'inserimento di bocchettoni posizionati nella volta e gli impianti di trattamento aria situati nelle zone piane del solaio di copertura; inoltre, il solaio di copertura è stato anche impermeabilizzato con una guaina bituminosa, non prevista dal progetto originale. [1]

Figura 27 : Fotografie attuali del padiglione B

Figura 28 : Fotografia attuale padiglione C

In vista delle Olimpiadi del 2006 sono stati effettuati dei test statici dallo studio di ingegneria Sintecna di Torino, per verificare l'idoneità in seguito agli interventi aggiuntivi per il trattamento aria.

Allo stato attuale il padiglione B presenta una serie di fessure nei solai delle balconate perimetrali, due importanti fessure nella zona di connessione tra la zona absidale e la zona espositiva, oltre ad un degrado ambientale dovuto all'abbandono della struttura.

Il padiglione C invece è prevalentemente integro, presenta delle crepe nella pavimentazione in un angolo del padiglione e fessure sporadiche negli intonaci degli arconi inclinati. [3]

Figura 29 : Fessurazione del solaio delle balconate del padiglione B

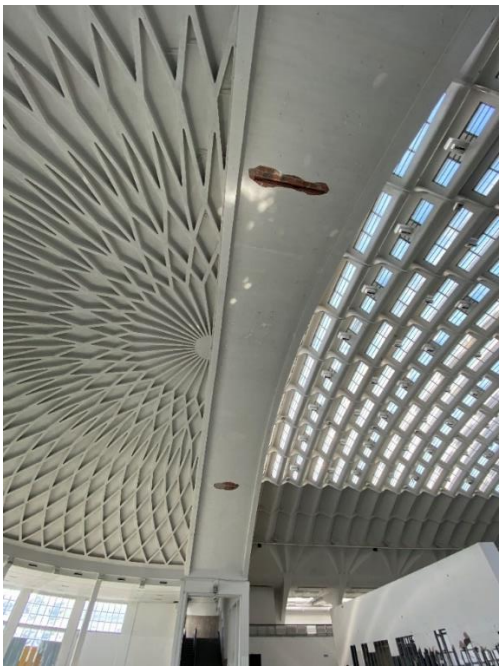


Figura 30 : Immagine della doppia fessurazione nella zona absidale

3. Il Ferrocemento nel mondo

3.1 Il ferrocemento

Il *ferrocemento* è un materiale simile al più comune calcestruzzo armato. La composizione base è una malta molto ricca di polvere di cemento Portland con aggregati fini. Il dosaggio di acqua è regolato in modo da avere una consistenza plastica. Vengono predisposti e formati diversi strati di reti metalliche su cui viene spalmata la malta cementizia.

La prima definizione di ferrocemento risale al 1852, da un estratto del brevetto depositato dal francese *Joseph-Louis Lambot*:

"La mia invenzione mostra un nuovo prodotto che aiuta a rimpiazzare il legname lì dove è maggiormente danneggiato da umidità, come pavimentazioni in legno, serbatoi di acqua, vasi di piante ecc. La nuova sostanza consiste in una rete di cavi o barre metalliche, connesse o formate in modo da avere una maglia flessibile. Do a questa rete la forma il più possibile simile all'oggetto finale che voglio creare. Dopo getto il cemento in modo da ricoprire la rete. "[4]

Il mix di acqua, polvere di cemento e sabbia può essere arricchita aggiungendo diversi additivi per facilitare la lavorabilità, accelerare o ritardare la maturazione, ridurre il quantitativo d'acqua necessario, aumentare la resistenza, l'adesione o aggiungere coloranti.

Il pacchetto è composto quindi da strati di rete metallica di diverse forme, barre di armature per incrementare lo spessore dell'elemento riducendo il numero di strati di rete. La presenza di barre di armatura non è obbligatoria.

Il risultato finale è un elemento molto sottile, con spessori che variano dai 12 ai 60 mm al cui interno sono presenti almeno due strati di rete come si vede nella Figura 31. [5]

Una prima distinzione del ferrocemento con il calcestruzzo armato è quindi la notevole presenza di percentuale di armatura rispetto al cemento.

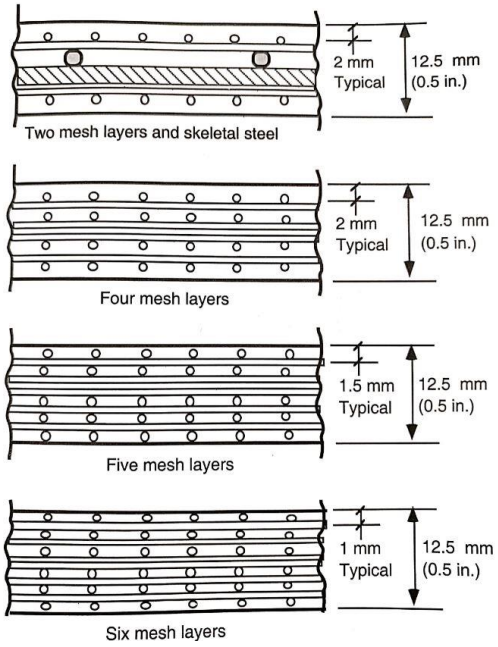


Figura 31 : esempi di una sezione in ferrocemento, A. Naaman

Le tipologie di rete utilizzabili sono a maglia quadrata, a maglia romboidale oppure una maglia esagonale. Tutte queste reti hanno in comune delle aperture molto piccole, dell'ordine del centimetro e possono essere elettrosaldate oppure intrecciate, subire un processo di galvanizzazione oppure no. [5]

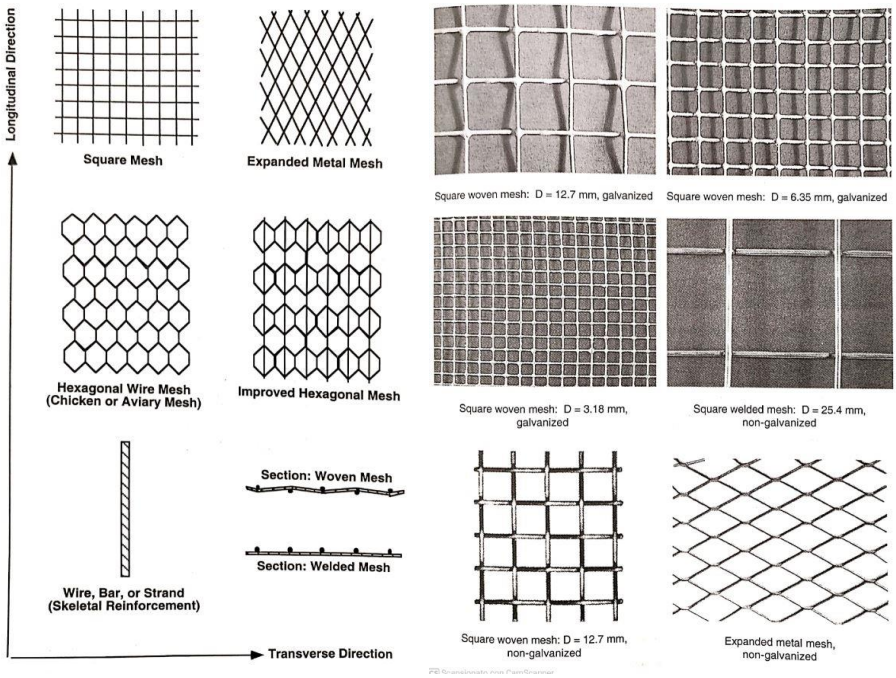


Figura 32 : Esempi di rete di armatura, A.Naaman

Il procedimento costruttivo è tratto dal brevetto del ferrocemento depositato dallo stesso Nervi nel 1948.

In sostanza occorre eseguire il getto cementizio facendolo penetrare, mediante la pressione della cazzuola o del fratazzo o appositi apparecchi vibranti, attraverso l'armatura metallica in modo che il cemento rifluisca dalla parte opposta da cui è iniziato il getto, riempiendo quindi completamente lo spessore della rete metallica.

L'operazione è resa possibile adottando una malta di opportuna plasticità, ottenuta variando la dosatura di cemento, sabbia o additivi (farina fossile, bentonite). Grazie a questa plasticità la malta aderisce alla rete metallica senza fluire, quindi viene trattenuta qualsiasi sia la posizione, verticale, inclinata che sia, senza la necessità di usare le casseformi come nelle costruzioni di cemento ordinarie. [6]

Una fase successiva è quella di regolarizzare il getto prima che sia indurito in modo da avere una buona finitura superficiale. Non occorre una rifinitura ad intonaco.

Per quanto riguarda il posizionamento dell'armatura prima del getto, è necessario avere una sufficiente robustezza in grado di resistere alla pressione esercitata per far penetrare la malta e per resistere alla malta ancora non indurita.

Sarà quindi necessario appoggiare l'armatura su dei ritti, travi, centine in legno o acciaio, poste a distanza dipendenti dalla intrinseca robustezza data dalla forma dell'armatura.

3.2 Comportamento tipico

Dal Capitolo 2 del libro di Antoine Namaan sul ferrocemento viene illustrata la tipica risposta carico-freccia del ferrocemento sottoposto a flessione semplice. Analizzando la figura vengono identificate le seguenti aree:

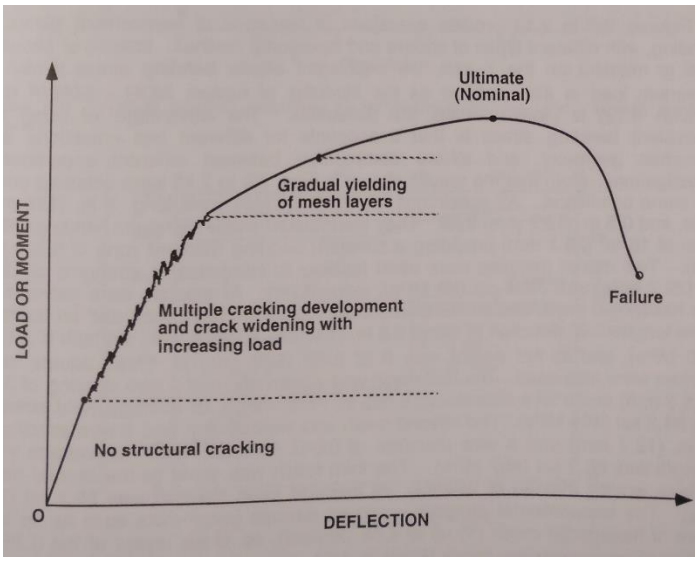


Figura 33 : Diagramma carico-freccia, A.Naaman

- Un tratto iniziale dove l'elemento non è fessurato;
- Una regione in cui si verificano fessurazioni multiple diffuse e la loro ampiezza aumenta con l'aumentare del carico;
- Una regione in cui si nota un graduale snervamento delle armature metalliche, lo snervamento è graduale perché ci sono diversi layer di armatura posti a profondità diverse;
- Una regione in cui si ha il massimo carico sopportabile;
- Una fase post picco dove si arriva alla rottura dell'elemento.

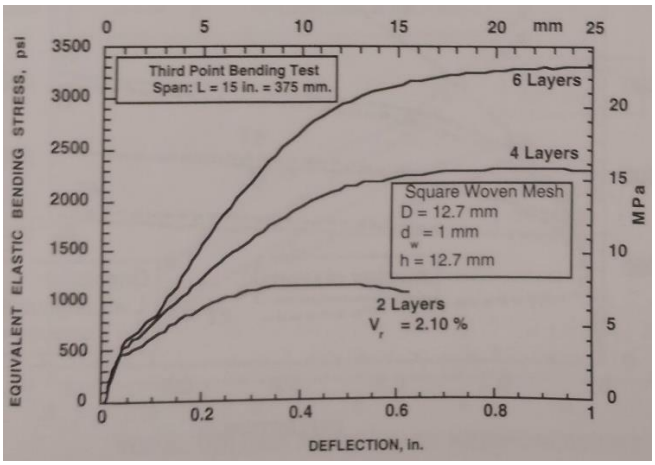


Figura 34 : Comportamento di una trave in ferrocemento con una rete a maglia quadrata, A.Naaman

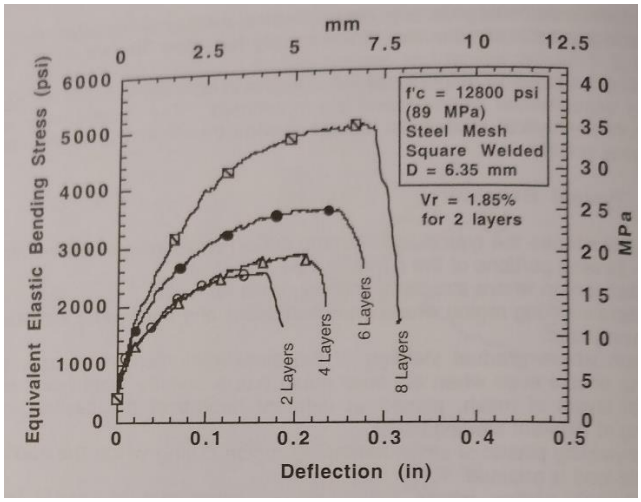


Figura 35 : Comportamento di una trave in ferrocemento con cemento ad alta resistenza, A.Naaman

Altre cause che facilitano la rottura del ferrocemento (e del calcestruzzo armato in generale) è la corrosione delle armature e la non completa penetrazione del mix di cemento nelle reti metalliche. L'armatura arrugginisce, aumenta di volume e causa la fessurazione del calcestruzzo. [7]

La naturale conseguenza è che una volta danneggiato, il calcestruzzo permette l'ingresso di ulteriori agenti corrosivi, instaurando quindi un ciclo di danneggiamento che porta inevitabilmente al crollo. La presenza di bolle d'aria e di armature esposte, sono due dei principali fattori che influenzano il processo di corrosione. Il problema delle bolle d'aria viene risolto vibrando efficacemente il calcestruzzo, mentre le reti possono ricevere un processo di galvanizzazione, questo le protegge ulteriormente dalla corrosione in ambiente ostile.

Il valore della tensione di snervamento dell'acciaio per le reti di armatura è molto vicino al valore che hanno le barre di armature per il calcestruzzo armato ordinario, come riportato nella tabella sottostante. [7]

		Woven square mesh	*Welded square mesh*	*Hexa-gonal mesh*	*Expanded metal lath*	*Longitu-dinal bars*
Yield Strength σ_{ry}	MPa	450	450	310	310	414
	(ksi)	(65)	(65)	(45)	(45)	(60)

Figura 36: Valori minimi di snervamento per armature, A. Naaman

Il ferrocemento oggi è diffuso prevalentemente nei paesi con basso costo di manodopera per la realizzazione di serbatoi idrici, piccoli edifici oppure in alcuni casi per opere ben più ardite.

Di seguito sono riportati diversi esempi di applicazione in giro per il mondo.

3.3 Serbatoi

Il ferrocemento viene spesso utilizzato per la realizzazione di serbatoi idrici, grazie alla sua longevità, bassa necessità di manutenzione e bassi costi di materiale e manodopera. [8]

Li troviamo soprattutto nei paesi in via di sviluppo, dove i serbatoi d'acqua sono fondamentali.

Il processo di costruzione di un serbatoio passa attraverso pochi semplici step:

- Realizzazione di una platea di fondazione, spesso circolare;
- Sistemazione degli strati di armatura dando forma a quello che sarà il serbatoio finale;
- Copertura delle reti di armatura con la mistura di calcestruzzo;
- Rivestimento con vernici impermeabili;

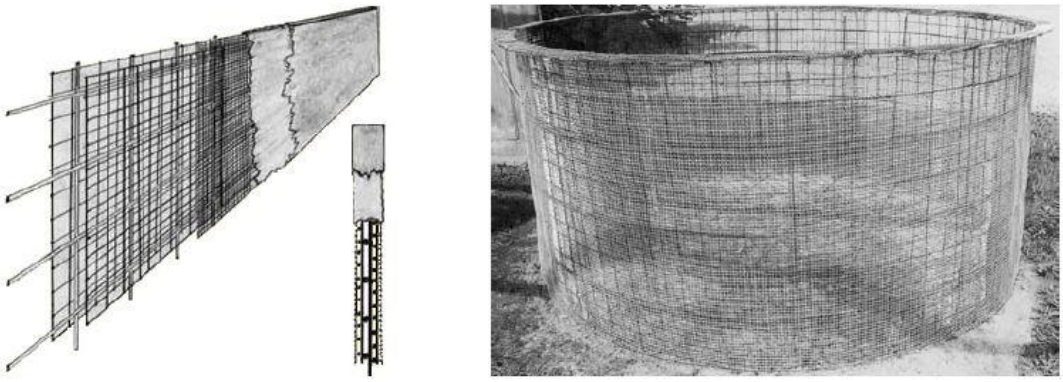


Figura 37 : Posizionamento reti di armatura di un serbatoio in ferrocemento

Figura 38 : realizzazione platea di fondazione

Figura 39 : Posa reti di armatura e inizio getti di calcestruzzo

Figura 40 : Fase di realizzazione copertura

Figura 41 : serbatoio finito

3.4 Barche

Una delle prime applicazioni del ferrocemento è stata la realizzazione di barche. Durante i conflitti mondiali, i costruttori di barche furono incoraggiati ad utilizzare il calcestruzzo, per evitare l'utilizzo di acciaio, destinato in primis per la costruzione di armi.

Progettate opportunamente, le barche in ferrocemento sono molto resistenti, necessitano di meno manodopera e hanno un peso simile alle barche in legno.

Nel 1887, un tedesco di nome Mr. Boon, costruì una piccola imbarcazione in ferrocemento per trasportare detriti e materiale, attraverso un canale. La barca è conosciuta come Zeemeuw ed è stata utilizzata nello zoo di Amsterdam anche molto tempo dopo, nel 1968. [5]

Nei primi del '40, Pier Luigi Nervi, ha riutilizzato il concetto di ferrocemento, sostenendo di poterlo utilizzare nella costruzione di barche da pesca. Puntualizzò che la distribuzione delle reti di armatura nel cemento producesse un materiale con proprietà meccaniche per lo più omogenee, capace di resistere a impatti elevati.

Testò il materiale per realizzare delle lastre, e dimostrò che il ferrocemento possedesse una eccezionale elasticità, flessibilità, forza e resistenza alla fessurazione. Nel 1943 il ferrocemento ha ricevuto il lasciapassare anche dalla Marina italiana.

Poco dopo Nervi dimostrò il potenziale di questo materiale costruendo "Irene" un motoveliero da 165 tonnellate, usando uno scafo in ferrocemento con uno spessore di 35 mm. [5]

Estremamente soddisfatto dalla riuscita di "Irene" Nervi approfondì notevolmente l'utilizzo del ferrocemento applicandolo principalmente all'edilizia.

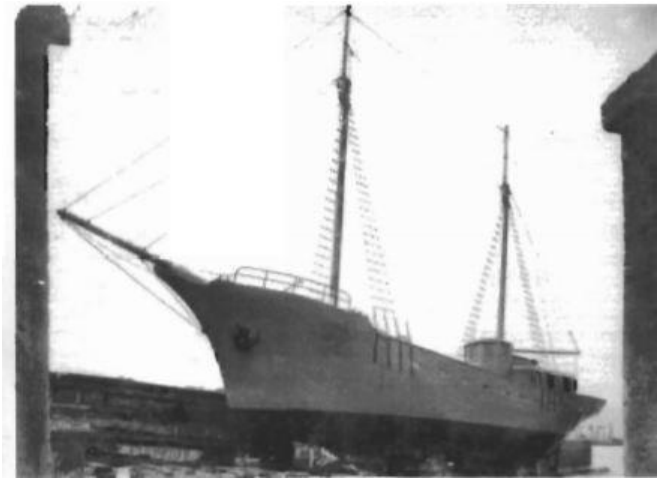


Figura 42 : Varo del motoveliero Irene

Il ferrocemento prese finalmente piede negli anni ’60 per la costruzione di barche nel Regno Unito, Nuova Zelanda, Canada e Australia. Seguirono poi l’Asia, America, Africa e poi Cina e Unione Sovietica. [5]

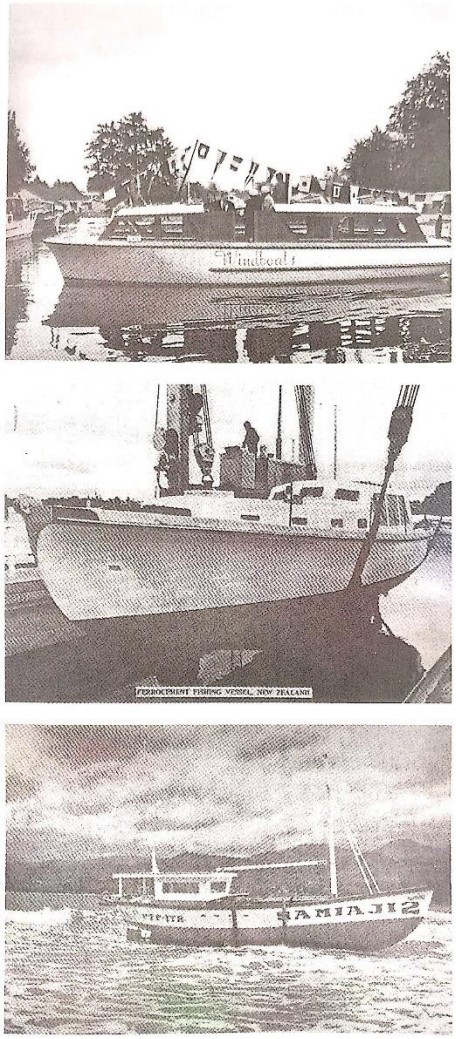


Figura 43 : Esempi di barche costruite in ferrocemento, A. Naaman

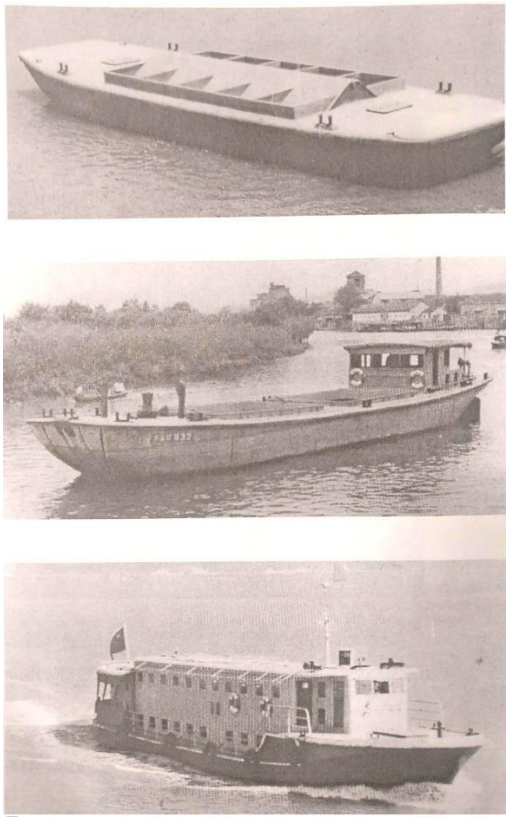


Figura 44 : Barche in ferrocemento in Cina, A. Naaman

Figura 45 : Realizzazione e costruzione di un veliero in ferrocemento in South Carolina nel 1970, A. Naaman

3.5 Edifici

Nel settore dell'edilizia il ferrocemento ha trovato la sua più ampia espressione, venendo utilizzato sia per opere minori come piccole case o granai per utilizzi agronomici, ma soprattutto per opere di grande architettura come le strutture di Antoni Gaudì. [7]

Il successo dell'utilizzo del ferrocemento in varie applicazioni terrestri è dovuto alla facilità di reperibilità del materiale, del basso livello di tecnologia necessario per la costruzione e il relativo basso costo del prodotto finale.

Uno dei maggiori vantaggi del suo utilizzo è che può essere costruito con un ampio range di proprietà meccaniche, qualità e costi, a seconda del budget a disposizione. Altro punto a favore che ne ha incentivato l'uso per le costruzioni di edifici monofamiliari in America è la possibilità di industrializzazione, producendo pannelli di varia dimensione che vengono poi assemblati in loco. [5]

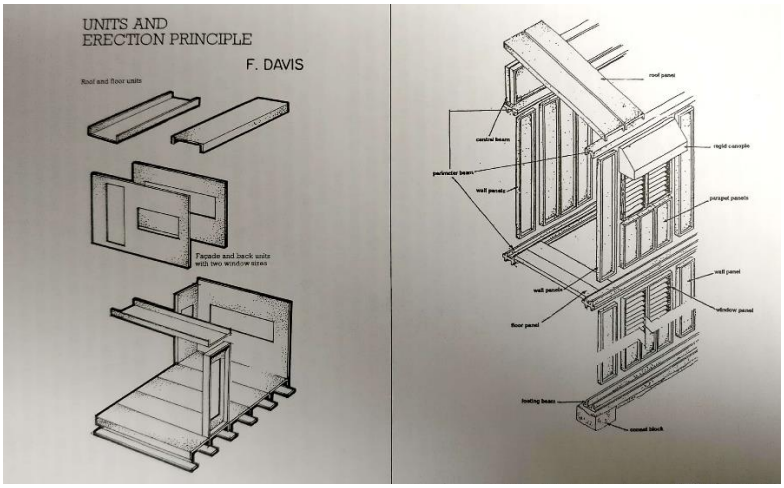


Figura 46 : Pannelli prefabbricati in ferrocemento assemblati per la costruzione di una casa, A. Naaman

Figura 47 : Pescheria in ferrocemento in New Mexico, A. Naaman

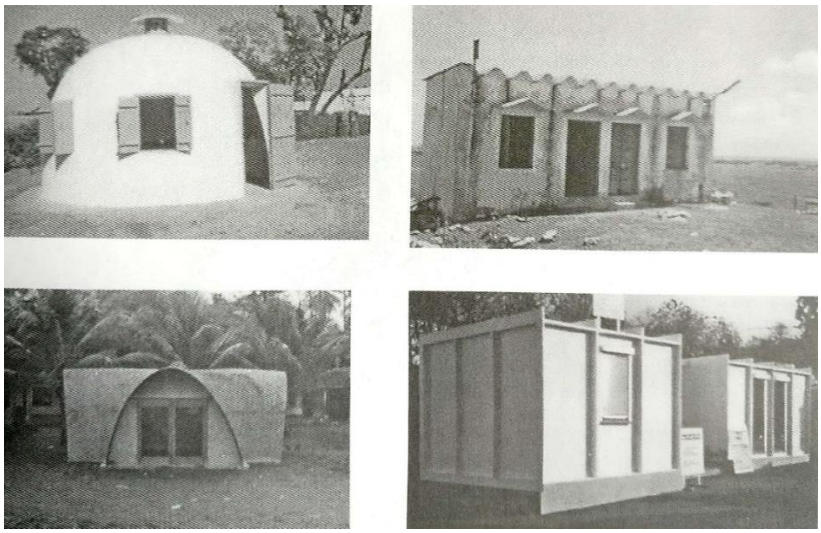


Figura 48 : Granai e depositi in ferrocemento, Bangkok, A. Naaman

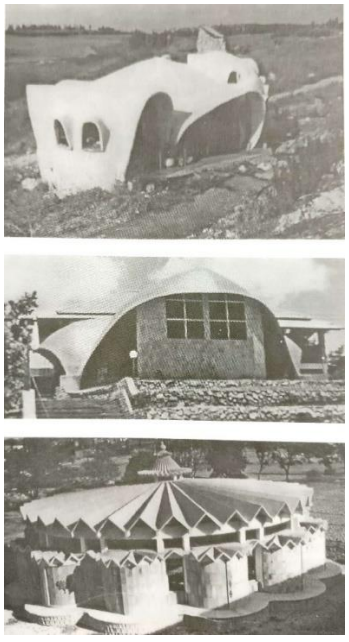


Figura 49 : case in ferrocemento in Israele e Bangkok;

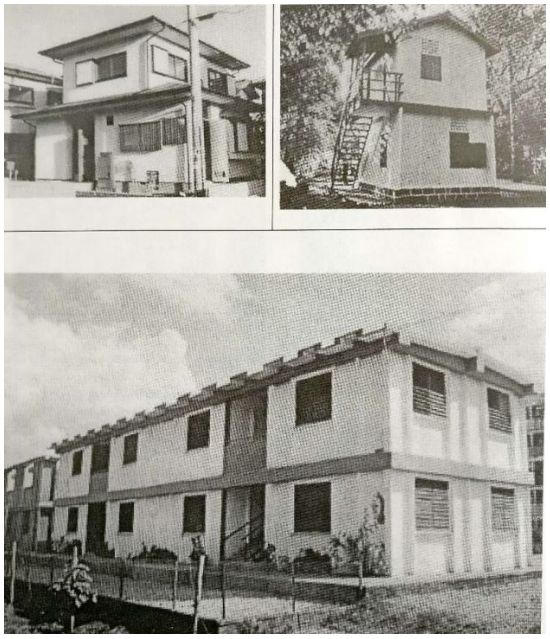


Figura 50 : Edifici a Bangkok e Cuba,

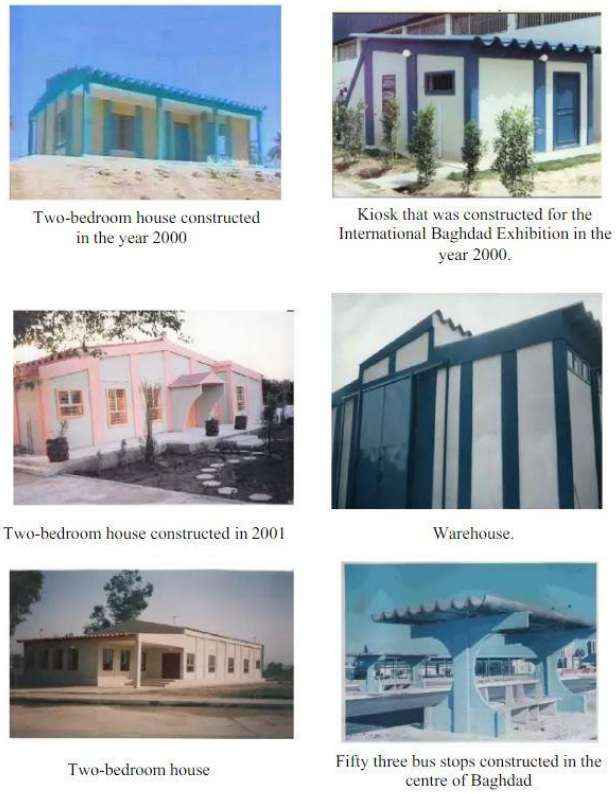


Figura 51 : Esempi di case e strutture in ferrocemento costruite in Iraq, A. Naaman

Anche Pierluigi Nervi ha dato il suo contributo alla realizzazione di un edificio in ferrocemento, si tratta del "Padiglione alla Magliana", realizzato nel 1944-1945.

La superficie perimetrale del padiglione è realizzata in ferrocemento di spessore pari a 3.5 cm e la sua resistenza è frutto della forma ondulata, a grande inerzia.

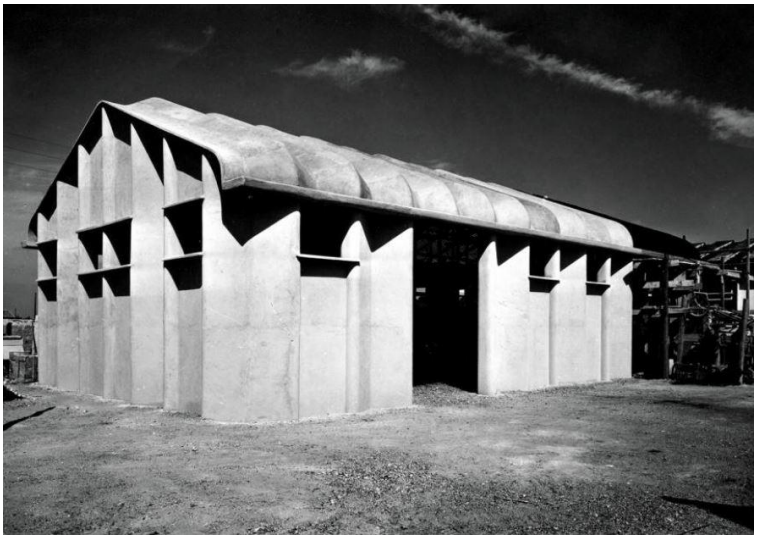


Figura 52 : Padiglione alla Magliana, Centro archivi architettura, Roma

Figura 53 : Foto, interno Padiglione alla Magliana

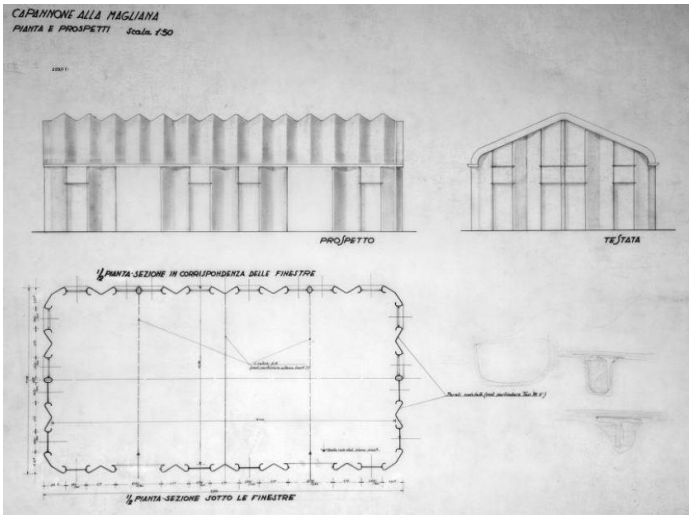


Figura 54 : Disegno pianta e sezione originali, CSAC, Università degli studi di Parma

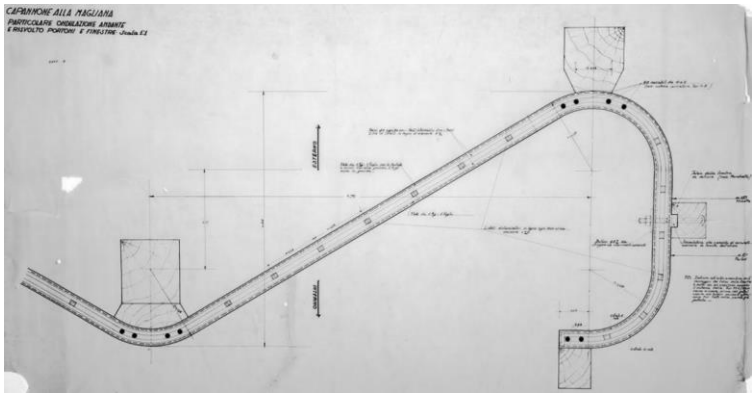


Figura 55 : Disegno di un particolare ondulato in ferrocemento, CSAC, Università degli studi di Parma

Il ferrocemento però è stato utilizzato anche per dar sfogo alla creatività realizzando delle coperture armoniose, pilastri che ricordassero elementi in natura, che va quindi a riallacciarsi alla biomimetica e architettura organica.

Figura 56 : Edifici realizzati in Messico dalla compagnia Flying Concrete

Figura 57 : Cupole in ferrocemento, Florida (sinistra) e Colorado (destra)

Figura 58 : Esempi estremi di architettura in ferrocemento, Messico

3.6 Cupole e grandi opere

Le grandi strutture a guscio vengono costruite con il criterio del risparmio di materiale e della ridistribuzione delle forze in sforzi membranali. Diviene cardine della progettazione quindi la resistenza per forma consentendo di avere dei gusci molto sottili che lavorano principalmente a compressione. [7]

Negli anni ci sono stati illustri ingegneri e architetti destreggiarsi con le cupole sottili, tra cui i famosi Isler e Candela, con le loro coperture sottili a doppia curvatura, e come visto in precedenza Pier Luigi Nervi utilizzatore della tecnica del ferrocemento per la costruzione di cupole, volte, coperture e hangar sparsi in tutto il mondo. [8]

Figura 59 : Oceanografic Restaurant di Candela, Spagna

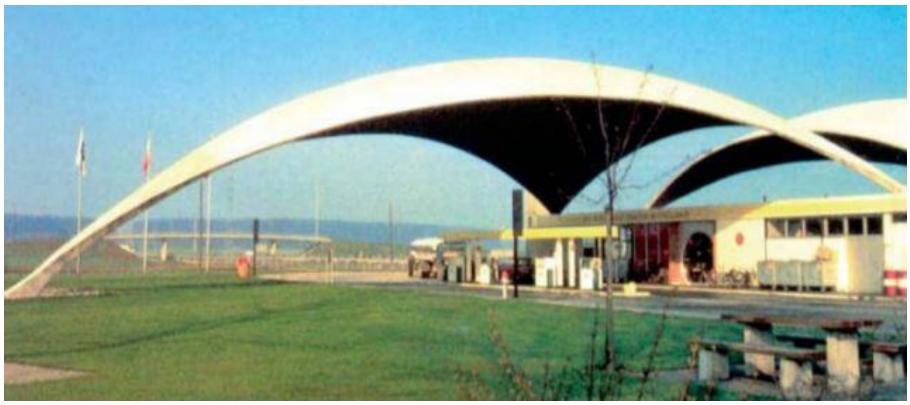


Figura 60 : Stazione di servizio di Isler, Svizzera

Nervi progettò e costruì numerose strutture utilizzando il ferrocemento, sfruttando la sua economicità, le sue proprietà meccaniche e le possibilità di prefabbricazione. Il suo lavoro venne apprezzato in giro per il mondo, concedendogli di esportare il suo genio anche oltre oceano.

Di seguito sono riportati alcuni esempi di applicazione del ferrocemento alle sue strutture:

- **Copertura Magazzino**

Progetto di una copertura di una grande sala di un magazzino a pianta rettangolare, sita in Torre di Pietra e costruita nel 1945.

La volta ribassata sottile è stata realizzata con elementi romboidali in ferrocemento, assemblati in loco e completati con un getto di calcestruzzo realizzando le famose nervature.

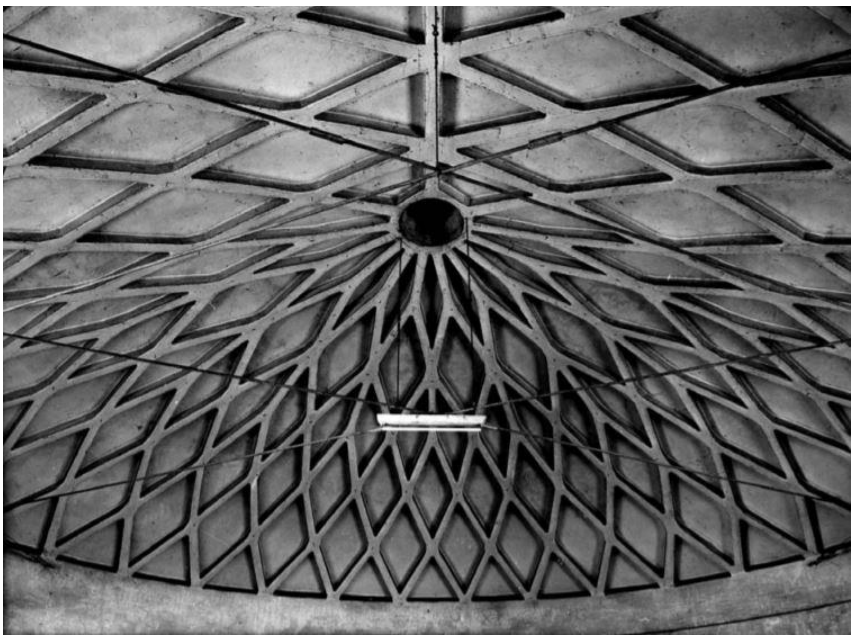


Figura 61 : Copertura Magazzino, Torre di Pietra, 1945

- **Tettoia Stazione ferroviaria**

Copertura di una stazione ferroviaria a Palermo. Una volta parabolica composta da elementi ondulati in ferrocemento. Il progetto però non è stato mai realizzato e l'idea degli elementi ondulati e finestrati è stata ripresa per la copertura del Padiglione B di Torino esposizioni.

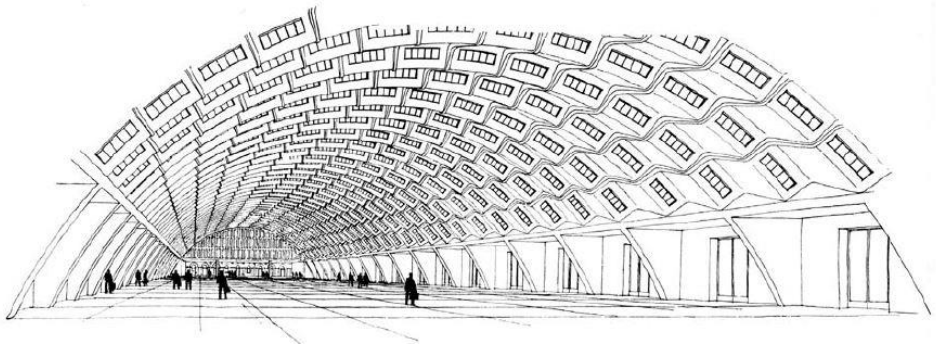


Figura 62 : Progetto di una copertura ferroviaria, Palermo

- **Piscina accademia navale**

Impianto sportivo realizzato su una pianta rettangolare, con una copertura a volta ad arco di cerchio composta da elementi prefabbricati di ferrocemento.

La volta è retta da pilastri inclinati secondo la tangente all'arco nel punto corrispondente al piano di imposta.

Figura 63 : Piscina Accademia Navale, Livorno

- **Padiglione B, Torino esposizioni**

Torino,1947-1948, nella realizzazione di questa grande copertura di un padiglione espositivo, Nervi riprende quel concetto mai realizzato a Palermo. La copertura, infatti è composta da una serie di elementi corrugati in ferrocemento, costruiti a terra e poi posizionati su delle centine. Viene poi effettuato il getto di completamento in opera.

L'abside della stessa è una semi cupola costituita da elementi romboidali, sempre in ferrocemento.

Figura 64 : Copertura padiglione B, Torino esposizioni

Figura 65 : abside padiglione B, Torino esposizioni

- **Magazzino per il deposito del sale**

Copertura di un magazzino realizzato a Tortona nel 1949. Ancora una volta siamo di fronte ad una copertura parabolica su pianta rettangolare con tavelloni in ferrocemento prefabbricati e nervati da un getto di completamento in calcestruzzo.

Figura 66 : Magazzino del sale, Tortona

- **Padiglione C, Torino Esposizioni**

Un salone espositivo coperto da una volta a botte ad elementi nervati in ferrocemento, supportata da quattro archi inclinati e un solaio perimetrale ondulato.

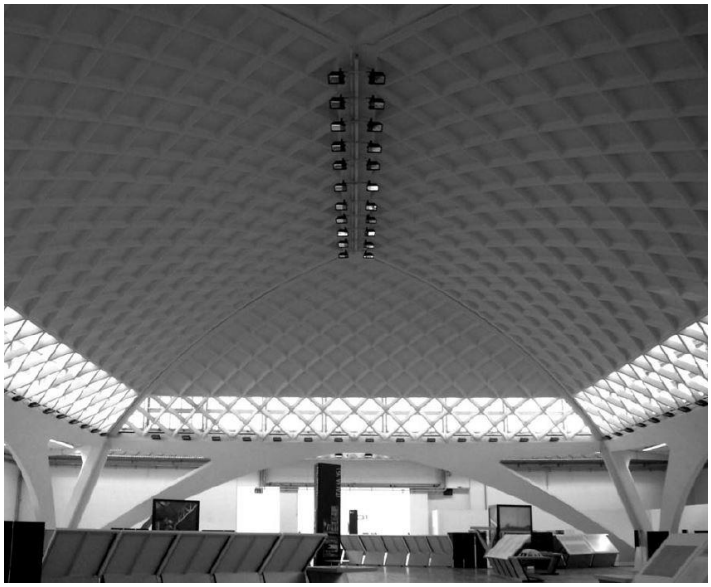


Figura 67 : Padiglione C, Torino esposizioni

- **Stabilimento balneare Kursaal**

Progetto e realizzazione di una sala circolare di uno stabilimento balneare di Castelfusano, nel 1950. La sala ha una copertura a volta con elementi romboidali in ferrocemento sorretti da un pilastro centrale. Oltre alla realizzazione della sala; Nervi ha progettato e realizzato anche il trampolino per tuffi, dello stesso stabilimento. Un trampolino con una base circolare di elementi in ferrocemento. [9]

Figura 68 : Stabilimento balneare Kursaal, Castelfusano

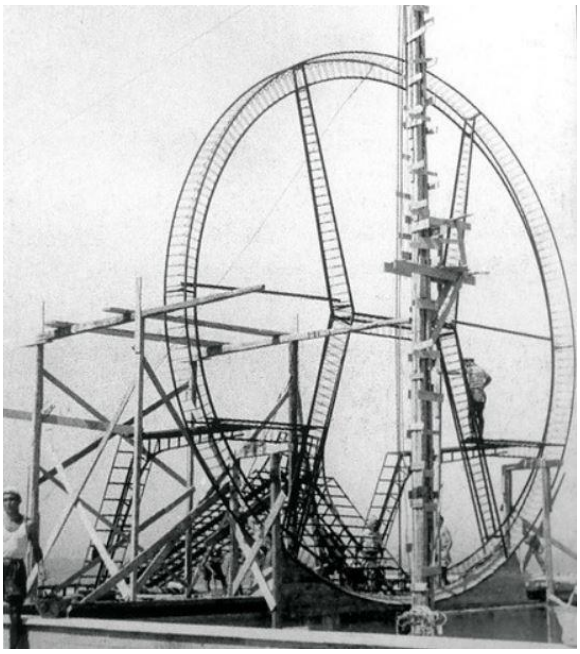


Figura 69 : Trampolino dello stabilimento di Ostia, costruito e in costruzione

- **Salone delle feste alle terme**

Salone a pianta ellittica, con solaio di copertura a cupola, formato da elementi prefabbricati in ferrocemento e nervature in calcestruzzo armato. Realizzato a Chianciano nel 1952. [9]

Figura 70 : Copertura salone Terme, Chianciano

- **Palazzetto dello sport I**

Edificio a pianta circolare che ospita il palazzetto dello sport a Roma, realizzato nel 1956. La cupola è una calotta sferica composta da elementi romboidali in ferrocemento, sorretta da 36 cavalletti a forma di "Y" disposti radialmente. [9]

Figura 71 : Palazzetto dello sport, Roma

Figura 72 : Interno del palazzetto dello sport, Roma

- **Palazzetto dello sport II**

Altro palazzetto dello sport, a Roma realizzato per le manifestazioni olimpiche di Roma 1960, caratterizzato da una calotta sferica poggiante su 48 pilastri di cemento armato. La cupola è composta da elementi radiali a "V" in ferrocemento.[9]

Figura 73 : Palazzetto dello sport, Roma

4. Prove in situ padiglione C

Durante il mese di Febbraio 2021 si sono svolte diagnosi strutturali all'interno del padiglione C, volte a valutare lo stato di conservazione della struttura dal punto di vista strutturale e funzionale. Sono stati effettuati dei carotaggi per la misura della profondità di carbonatazione e le misurazioni della corrosione nei 4 arconi. La fase zero delle attività è stata la rimozione dell'intonaco nei punti stabiliti in precedenza e riportati nella mappa in Figura 74.

Una volta rimosso il considerevole strato di intonaco sono state realizzate delle griglie utilizzando il pacometro. Il pacometro è uno strumento non distruttivo utile a rilevare la presenza, la direzione e la profondità di barre di armatura.

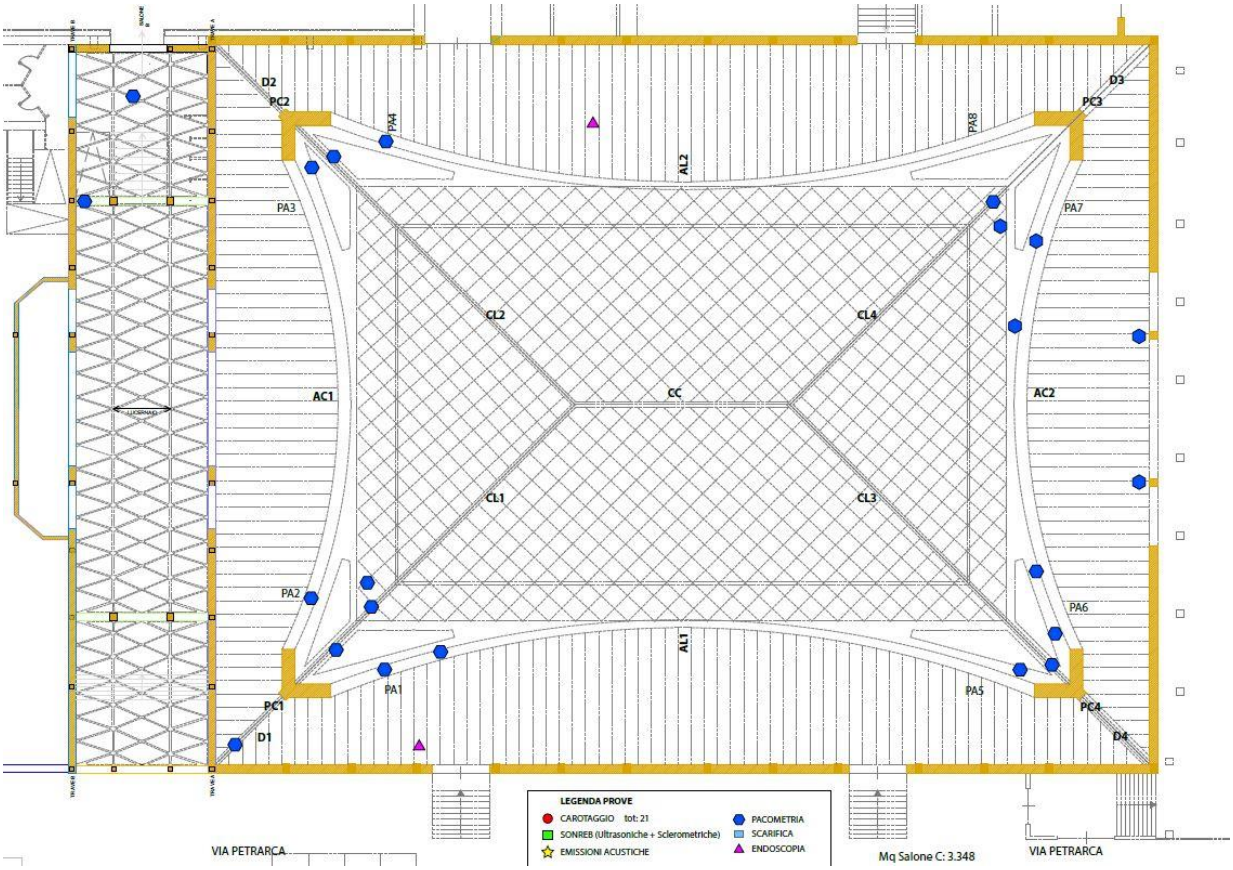


Figura 74 : Mappa prove

La pacometria quindi è stata realizzata per rilevare le barre di armatura negli arconi, in modo da poter realizzare con l'utilizzo di gessetti delle griglie da utilizzare per le misurazioni successive con lo strumento Giatec ICOR.

Successivamente mediante l'utilizzo di un trapano è stato rimosso il copriferro, scoprendo una barra longitudinale oppure una staffa, in modo da poter agganciare un morsetto e realizzare il circuito elettrico per le misure di potenziale.

Figura 75 : Morsetto agganciato ad una staffa di armatura

4.1 Carotaggi

Una volta disegnate le griglie che rappresentano la posizione delle armature sono stati effettuati i carotaggi all'estradosso degli archi. La carota estratta è stata spruzzata con una sostanza chimica, la fenolftaleina, la quale reagendo con un ambiente con pH superiore a 9 presenta una colorazione viola, lasciando incolore invece le zone carbonatate che presentano pH inferiori. Quindi è stata misurata con un centimetro la profondità di penetrazione della carbonatazione nel calcestruzzo.

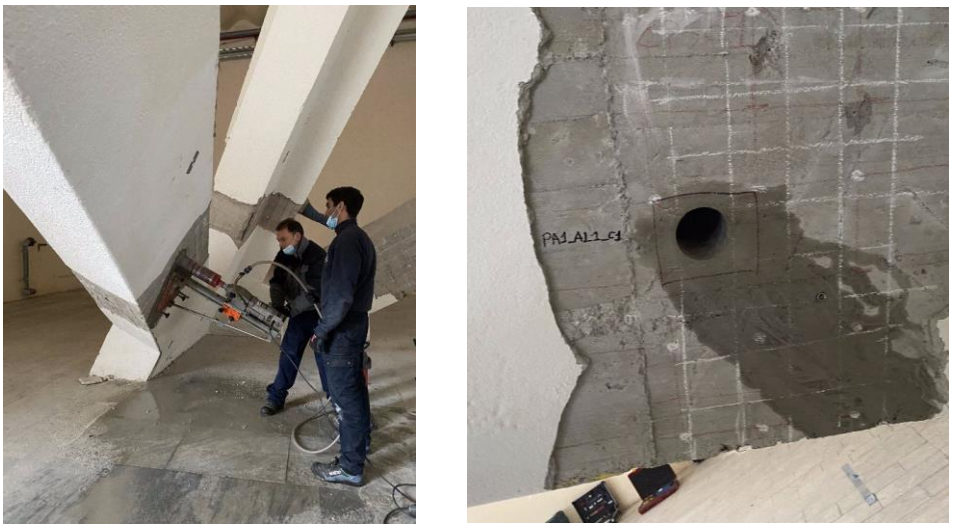


Figura 76 : Estrazione della carota PA1_AL1_C1

Figura 77 : Carota prima e dopo applicazione della fenolftaleina

In questo caso si può notare come la carota presenta un colore uniforme viola, sta ad indicare l'assenza di carbonatazione in quella zona dell'arco.

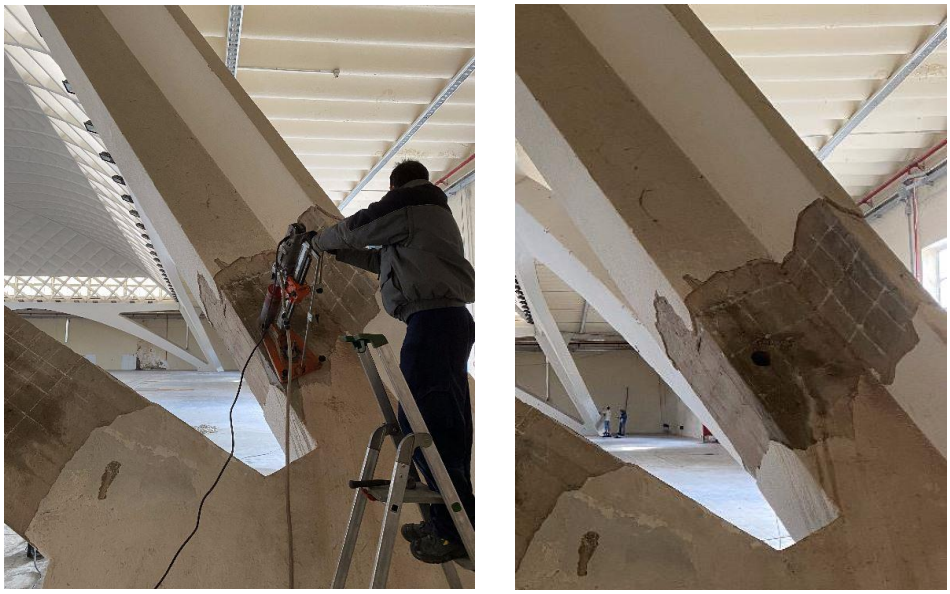


Figura 78: Estrazione della Carota PC1_C5

Figura 79: Carota PC1_C5

In questo caso si può osservare la presenza di uno strato carbonatato di circa 50 mm e si può notare anche la quantità di vuoti nel calcestruzzo, indice di un calcestruzzo non compatto e di scarsa qualità. Questa osservazione viene

spiegata dalla conoscenza dei diversi cementi utilizzati per la costruzione degli arconi. Il cemento per il pilastro PC1 è di tipo 500, di peggiore qualità rispetto a quello utilizzato per la realizzazione degli elementi ad arco, di tipo 680, come spiegato nella Figura 22 del capitolo 2.

Figura 80 : Estrazione della carota PA2_AC1_C7

Figura 81 : Carota PA2_AC1_C7 prima e dopo fenolftaleina

In questo caso ritroviamo una situazione con un calcestruzzo più omogeneo rispetto al caso precedente, infatti anche la profondità di carbonatazione è decisamente minore rispetto a prima, 20 mm rispetto a 50 mm.

4.2 Misura potenziale di corrosione

La corrosione nelle barre di armatura è un processo elettrochimico in cui gli elettroni migrano dalla zona anodica alla zona catodica, rilasciando ioni ferrosi all'anodo e ioni idrossido al catodo. Il moto degli elettroni è causato da una differenza di potenziale tra la zona anodica, a potenziale minore, e la zona catodica, con potenziale maggiore.

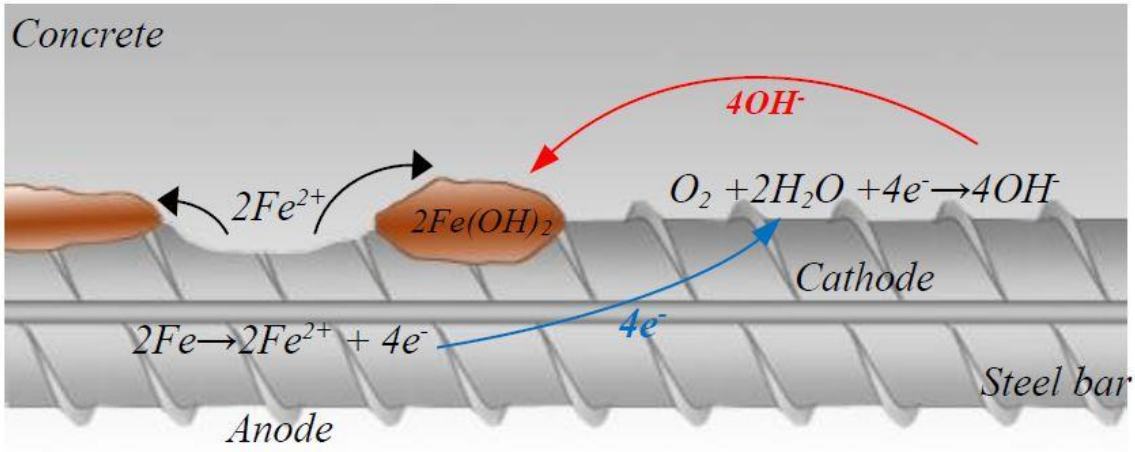


Figura 82 : Reazione di ossidazione

Il processo di corrosione si avvale di un mezzo elettrolitico, in questo caso il calcestruzzo umido e dell'ossigeno come reagente.

La barra di acciaio a contatto con il calcestruzzo integro, si trova in un ambiente basico, con un pH di circa 13, questo porta alla formazione di un film di ossido passivante che protegge la barra di armatura dalla corrosione.

Quando il livello di pH si abbassa, a causa principalmente dell'azione di agenti esterni come, ad esempio, attacco di cloruri o carbonatazione, il film passivante che ricopre la barra svanisce. Da questo punto inizia l'attività elettrochimica sopra descritta che procede fintanto che nel sistema ci sia umidità e ossigeno, agenti fondamentali per far avvenire le reazioni chimiche. [10]

Secondo le specifiche ASTM e successive revisioni, si considerano aree affette da corrosione quelle aree dove viene misurato un potenziale minore di -240 mV che corrisponde al momento in cui si ha la depassivazione dell'acciaio, per valori inferiori a -350 mV si ha il 90% di probabilità che ci sia corrosione attiva.

Il secondo parametro utilizzato nella valutazione della presenza di corrosione è la resistività elettrica del calcestruzzo, misurata in Ohm. La resistività del calcestruzzo è una proprietà che ci fornisce un'indicazione su quanto il calcestruzzo ostacola il passaggio di elettroni. In generale per valori bassi di resistività si è in una zona con la velocità di corrosione elevata.

Infine, come ultimo parametro si misura la velocità di corrosione, che può essere espressa come diminuzione dello spessore per unità di superficie e di tempo. La diminuzione dello spessore è dovuta al processo corrosivo della barra di armatura. Può essere misurato in $\mu A/cm^2$ oppure μm/anno. [11]

L'obiettivo del presente lavoro è stato quello di misurare il potenziale di corrosione delle barre di armatura presenti nei 4 arconi del Padiglione C di Torino Esposizioni.

Dalle ispezioni visive effettuate preliminarmente, si è notato un calcestruzzo per lo più intatto senza grossi problemi e fessure. Si son riscontrate schegge di legno risalenti ai casseri usati durante il getto e alcune staffe che fuoriuscivano dalla superficie esterna del calcestruzzo.

Dall' indagine visiva le zone più colpite sono i pilastroni centrali dove si è ipotizzata una corrosione dovuta a risalita capillare dalle fondazioni. Come mostrato in Figura 87, alla base del pilastro PC1 vi è un'armatura notevolmente corrosa che ha fatto saltare il copriferro localmente.

Figura 83 : Barra di armatura corrosa alla base del PC1

Figura 84 : Scarifica e pulizia dello strato di calcestruzzo dall'intonaco

L’obiettivo principale è quello di misurare il potenziale di corrosione nelle armature, quindi capire se ci sono probabilità di corrosione attiva oppure no.

Lo strumento utilizzato per questo tipo di misurazione è il “*Giatec ICOR*”, un dispositivo per test non distruttivi che permette di valutare il potenziale e la velocità di corrosione nelle armature e il calcolo della resistività del calcestruzzo.

La strumentazione è composta da sei elettrodi più un elettrodo di riferimento; i dati sono inviati ad un tablet di controllo che opera attraverso un apposito software sviluppato dalla casa produttrice.

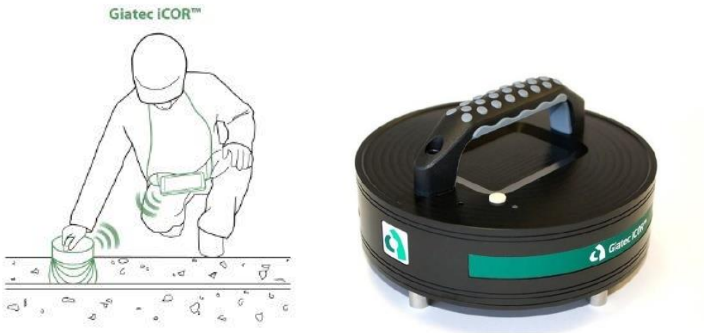


Figura 85 : Esempio di misurazione e dispositivo ICOR

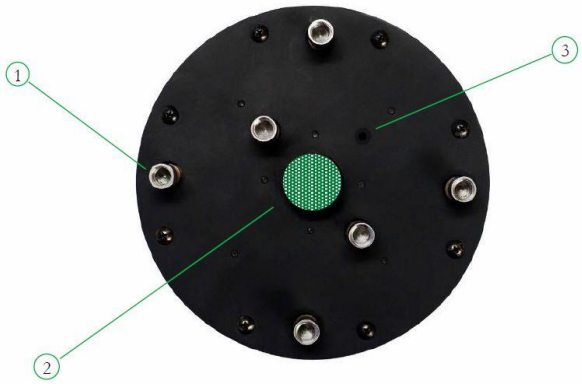


Figura 86 : Dispositivo ICOR visto dal basso

1) Elettrodo per la misura della corrosione delle armature;
2) Elettrodo per la misura del potenziale del calcestruzzo armato;
3) Sensore per umidità relativa e temperatura;

La procedura prima di eseguire la prova si articola nei seguenti step:

- Preparazione della griglia di misura;
- Inumidire con acqua nebulizzata la superficie della griglia;
- Riportare manualmente la griglia sul software;
- Verificare il funzionamento del dispositivo con apposito tester in dotazione;
- Inserire un gel conduttivo all'interno di ogni elettrodo;

- Inumidire apposite spugnette cilindriche e inserirle negli elettrodi;
- Creare un collegamento con la barra di armatura mediante un morsetto;
- Posizionare lo strumento opportunamente sulla griglia e iniziare l'acquisizione nella direzione X e Y; [10]

Per preparare la griglia bisogna individuare la posizione delle barre longitudinali e le staffe, utilizzando il pacometro. Spostando opportunamente lo strumento nell'aria di analisi vengono segnate con un gessetto le armature e vengono annotati i relativi copri ferri.

In questa fase è stato possibile verificare la variabilità in termini di posizione e copriferro delle barre rispetto a quanto riportato nel progetto.

Figura 87 : Pacometria e disegno della griglia di armatura

Una volta segnata la griglia si inumidisce in modo da creare un ambiente idoneo al passaggio di elettroni durante la misurazione. Bagnata la superficie bisogna attendere circa 30 minuti in modo che l'acqua penetri efficacemente nel calcestruzzo fino ad arrivare alla barra di armatura.

Figura 88 : Due griglie inumidite prima della misura

Quando la superficie è pronta e il morsetto collegato alla barra, si inizia ad acquisire i dati, posizionandosi nei nodi della griglia e orientando lo strumento lungo le staffe (Direzione Y) e le barre longitudinali (Direzione X).

Figura 89 : Misura con ICOR

Si riportano di seguito le soglie stabilite dalle norme ASTM C876 e RILEM TC-154,2003 per le misure di potenziale, resistività elettrica e velocità di corrosione:

Tabella 3: Relazione tra valori di potenziale e probabilità di corrosione

Potenziale misurato (mV/CSE)	***Probabilità di attività corrosiva***
>-200	Meno del 10 %
-200 /-350	Incerto
<-350	Più del 90%

*CSE= Copper Sulfate Electrode (Elettrodo in solfato di rame)

Tabella 4: Resistività elettrica del calcestruzzo

Colore	***Resistività (ohm.m)***	***Classificazione***
Verde	>200	Molto alto
Giallo	100-200	Alto
Arancione	50-100	Moderato
Rosso	<50	Basso

Tabella 4 : Mappa grado di corrosione

Colore	***Velocità di corrosione (μA/cm²)***	***Classificazione***
Verde	<1	Basso
Giallo	1-3	Moderato
Arancione	3-10	Alto
Rosso	>10	Grave

4.3 Risultati ICOR

Sono state analizzate in tutto 20 griglie situate su archi e pilastri, seguendo la nomenclatura degli elementi riportati in Figura 74 e due griglie ricavate da due pilastri appartenenti al muro perimetrale:

- *PA1_Esterno*

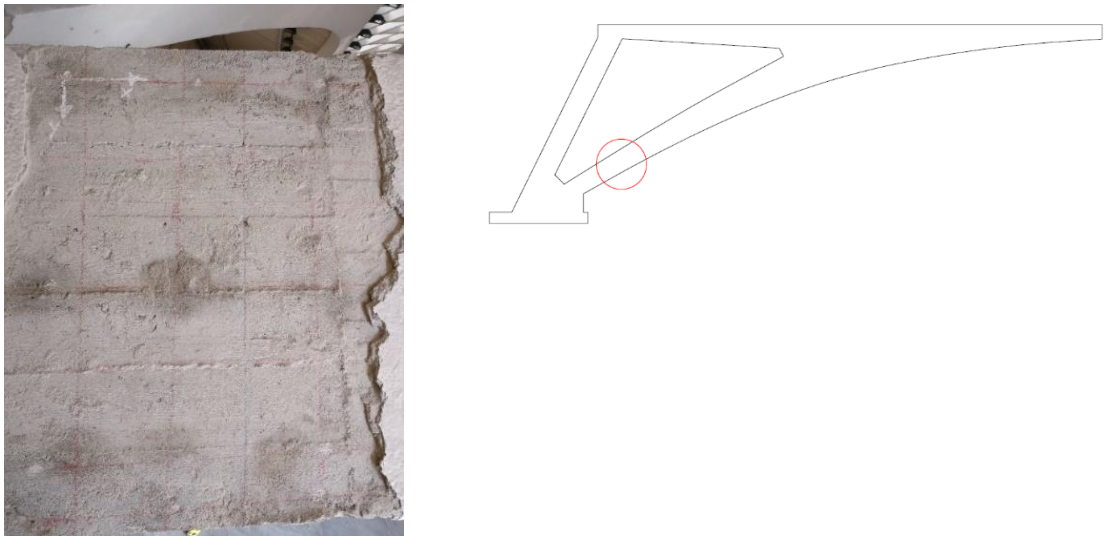
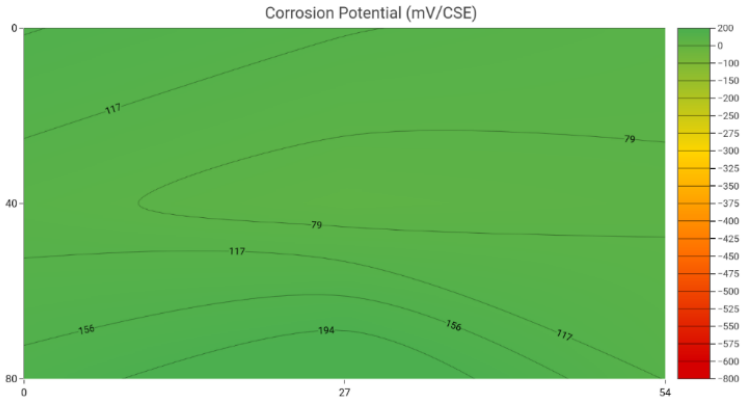
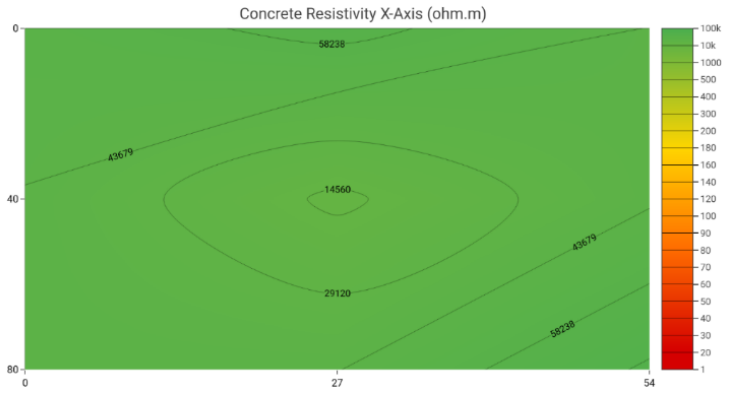
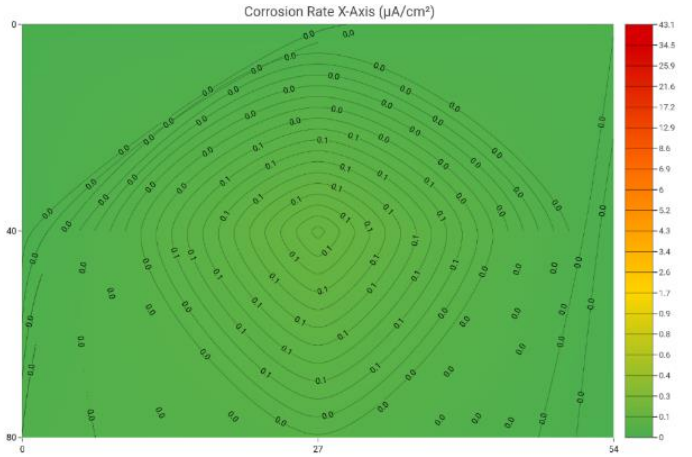


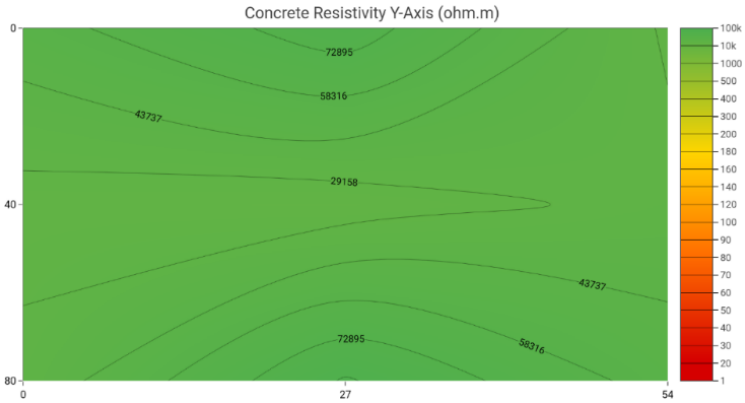
Figura 90 : Griglia PA1_Esterno

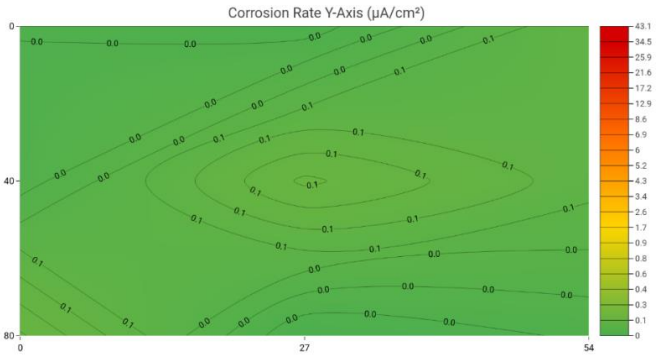
Considerando i punti della griglia, i quali hanno fornito i valori di potenziale di corrosione, resistività del calcestruzzo e grado di corrosione, il software interpola eventuali punti mancanti e realizza delle mappe dei risultati.




Concrete Resistivity X-Axis (ohm.m)
58238
43679
14560
43679
29120
58238
0
40
80
0
27
54
100k
10k
1000
500
400
300
200
180
160
140
120
100
90
80
70
60
50
40
30
20
1


Corrosion Rate X-Axis (µA/cm²)
0
40
80
0
27
54
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0


Concrete Resistivity Y-Axis (ohm.m)
72895
58316
43737
29158
43737
72895
58316
0
40
80
0
27
54
100k
10k
1000
500
400
300
200
180
160
140
120
100
90
80
70
60
50
40
30
20
1


Corrosion Rate Y-Axis (µA/cm²)
0
40
80
0
27
54
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0

- *PA1_Inferiore*

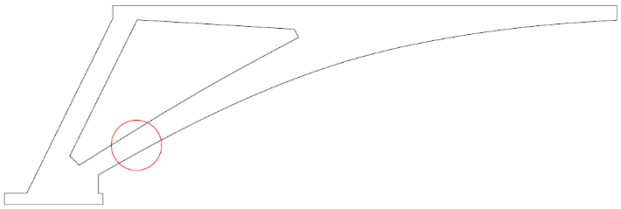
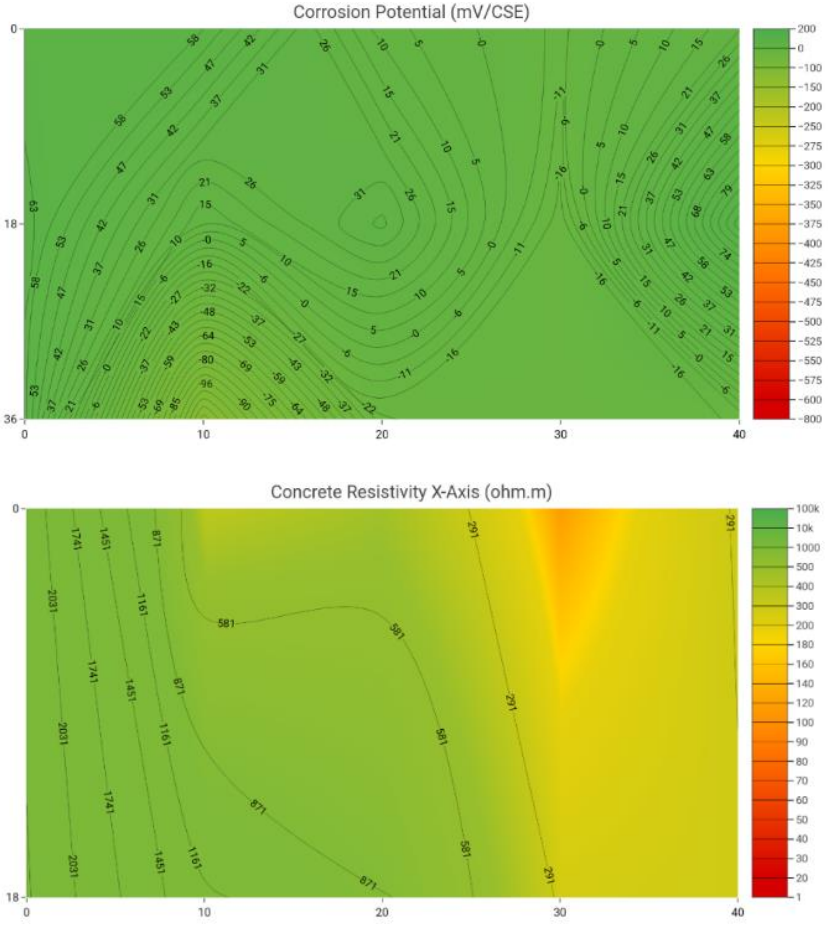
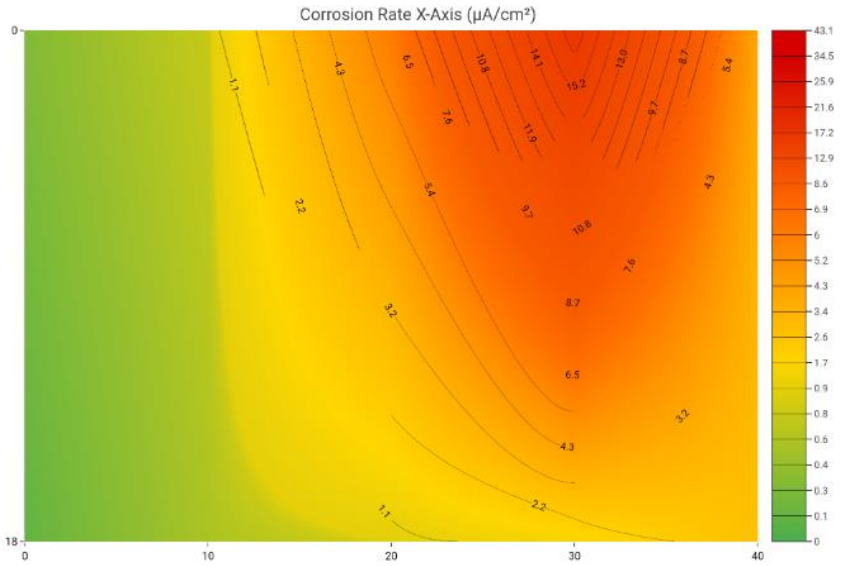
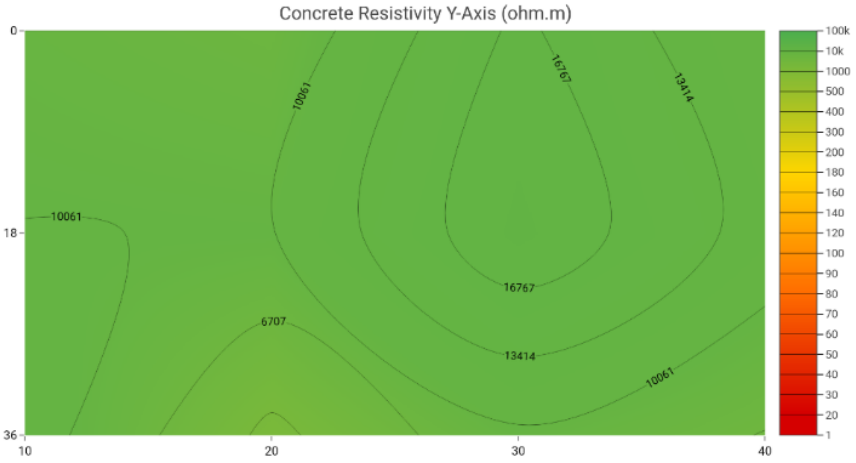
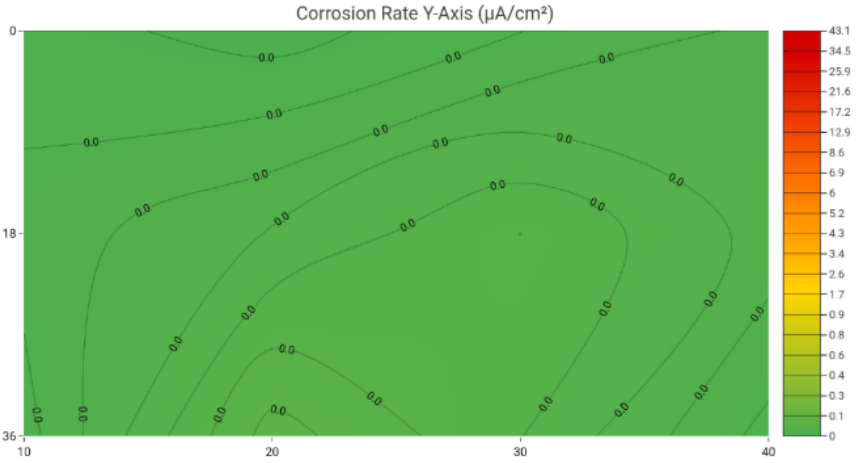


Figura 91 : Griglia PA1_Inferiore




Corrosion Rate X-Axis (µA/cm²)
0
18
0
10
20
30
40
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0


Concrete Resistivity Y-Axis (ohm.m)
0
18
36
10
20
30
40
100k
10k
1000
500
400
300
200
180
160
140
120
100
90
80
70
60
50
40
30
20
1
10061
16767
13414
6707


Corrosion Rate Y-Axis (µA/cm²)
0
18
36
10
20
30
40
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0
0.0

- *PA1_Interno*

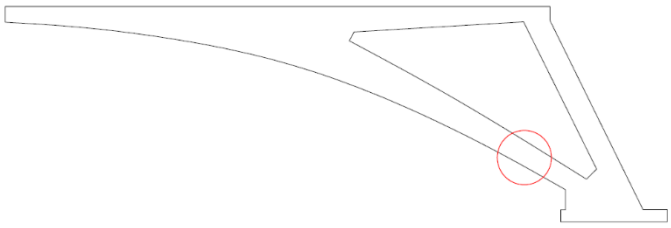
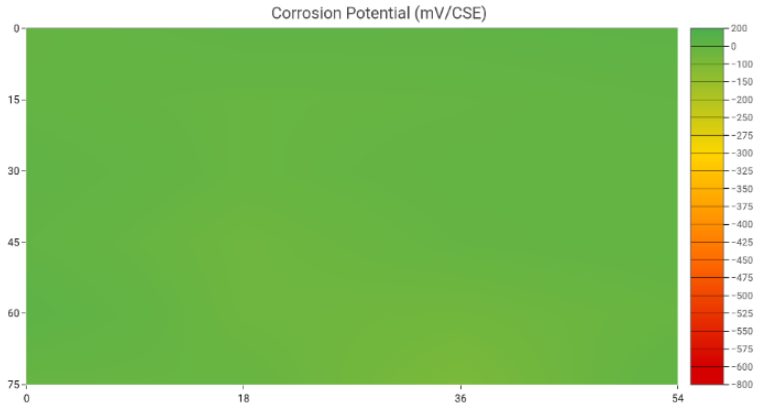
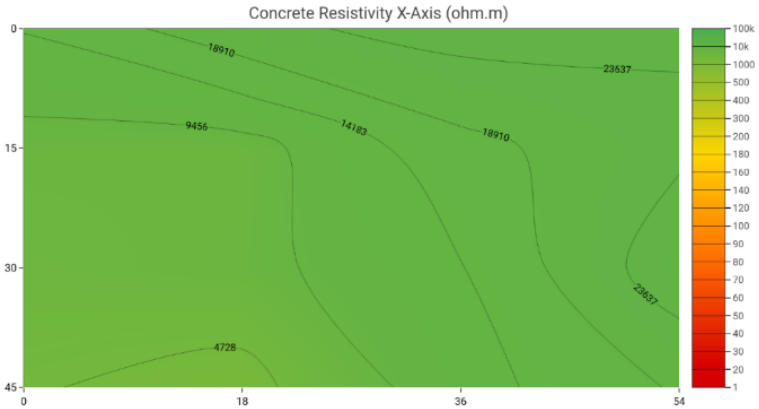
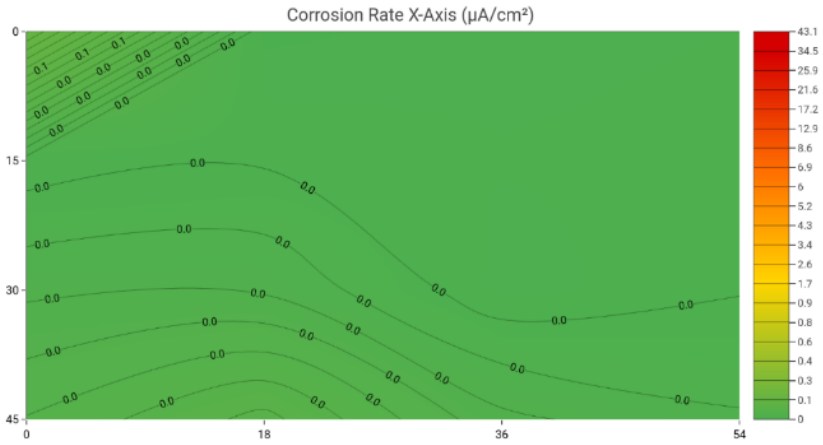
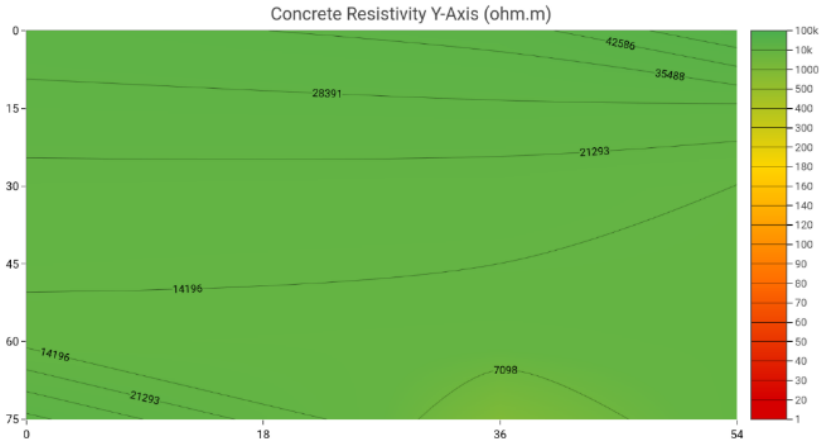


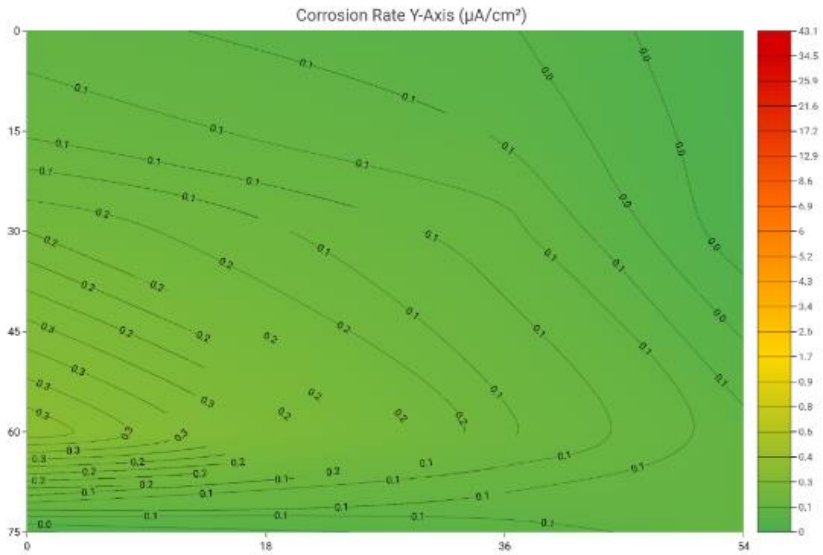
Figura 92 : Griglia PA1_Interno






Corrosion Rate X-Axis (µA/cm²)
0
15
30
45
0
18
36
54
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0


Concrete Resistivity Y-Axis (ohm.m)
0
15
30
45
60
75
0
18
36
54
42586
35488
28391
21293
14196
14196
21293
7098
100k
10k
1000
500
400
300
200
180
160
140
120
100
90
80
70
60
50
40
30
20
1


Corrosion Rate Y-Axis (µA/cm²)
0
15
30
45
60
75
0
18
36
54
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0

- *PA2_Esterno*

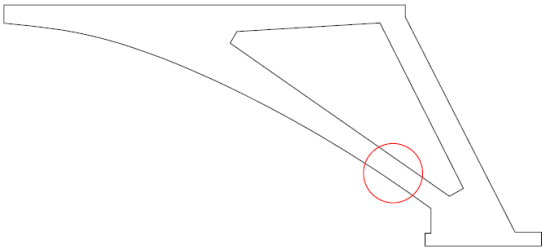
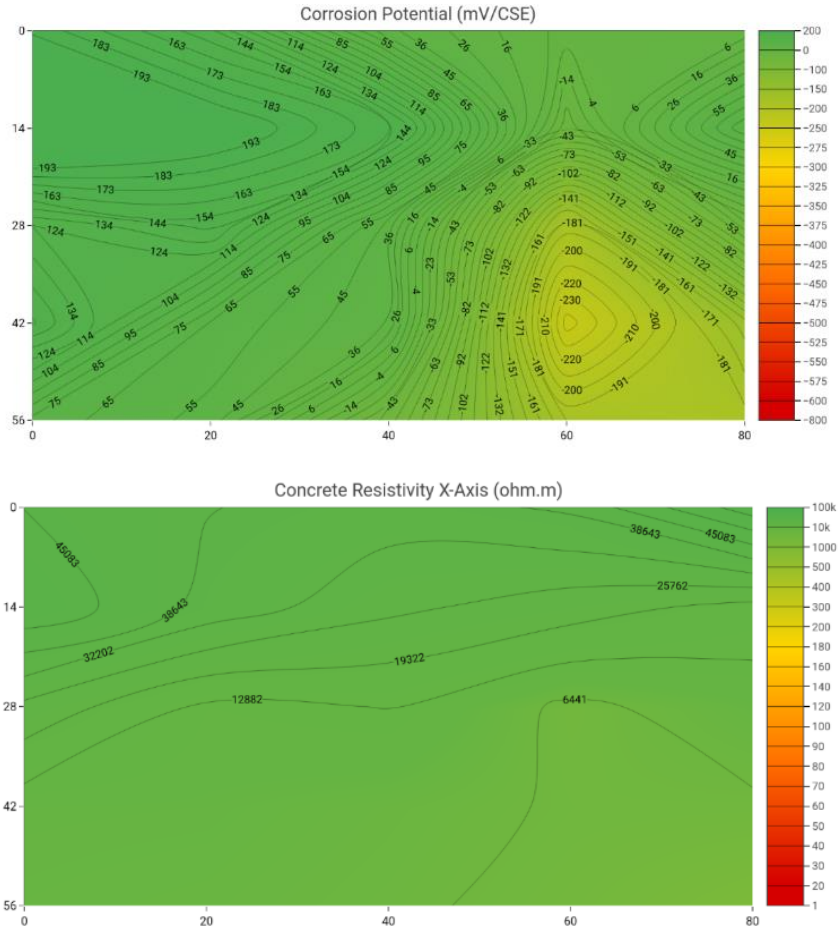
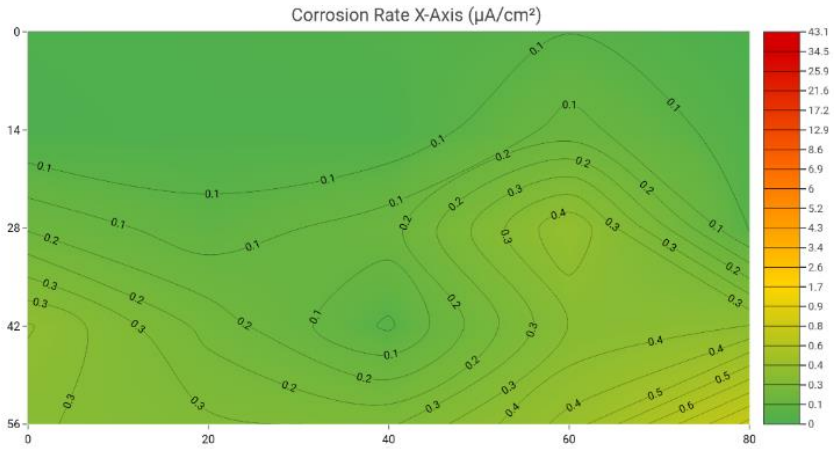
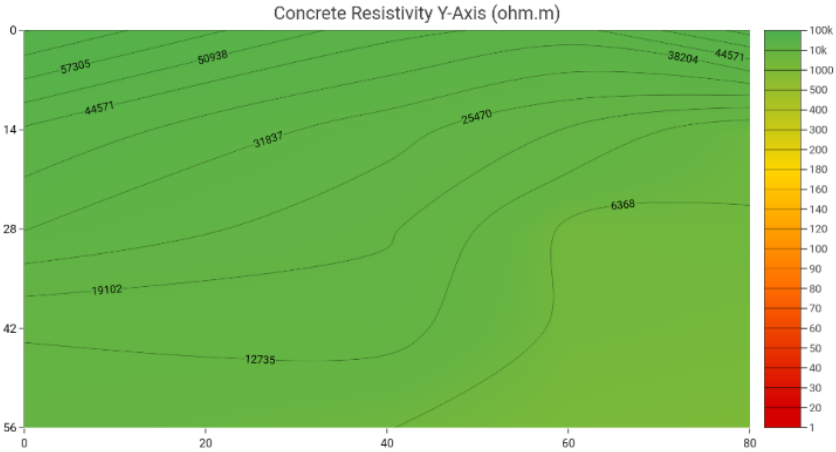
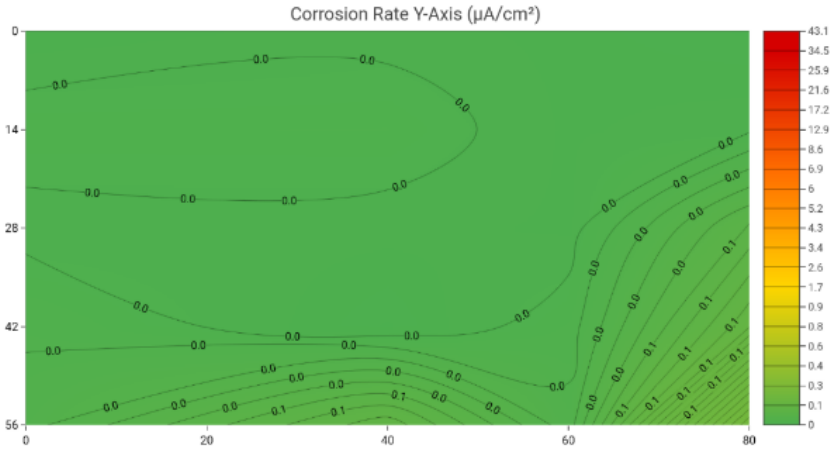


Figura 93 : Griglia PA2_Esterno




Corrosion Rate X-Axis (µA/cm²)
0
14
28
42
56
0
20
40
60
80
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0


Concrete Resistivity Y-Axis (ohm.m)
0
14
28
42
56
0
20
40
60
80
57305
50938
44571
38204
44571
31837
25470
6368
19102
12735
100k
10k
1000
500
400
300
200
180
160
140
120
100
90
80
70
60
50
40
30
20
1


Corrosion Rate Y-Axis (µA/cm²)
0
14
28
42
56
0
20
40
60
80
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0

- *PA2_Interno*

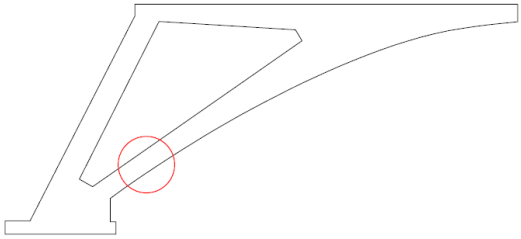
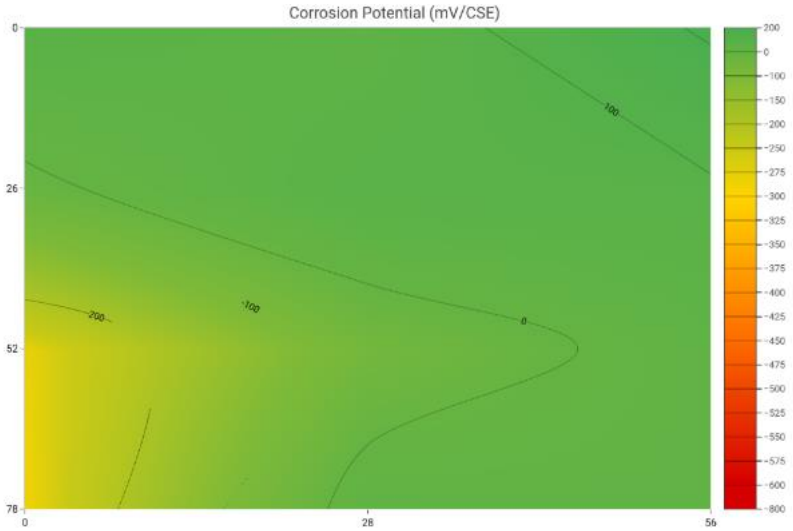
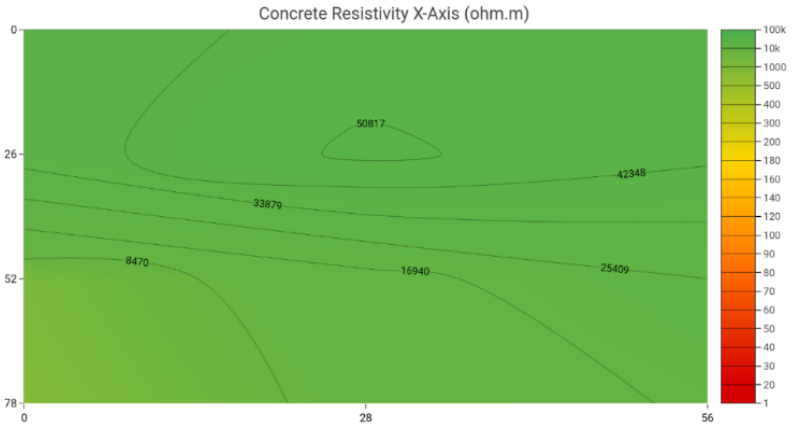
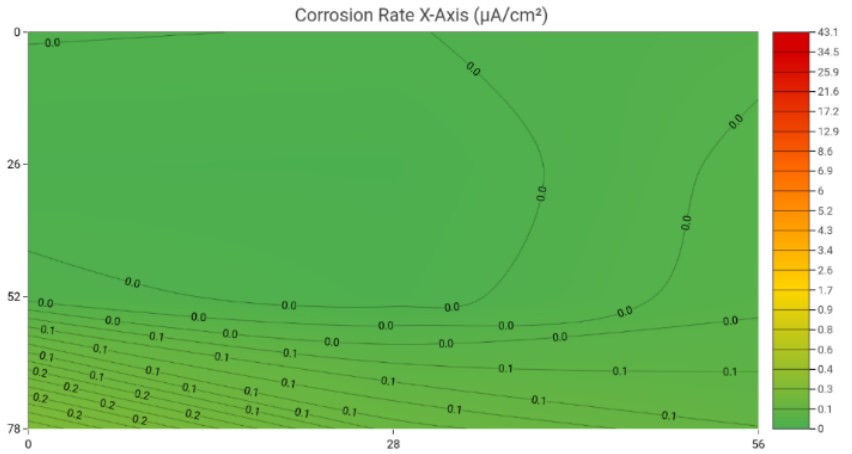
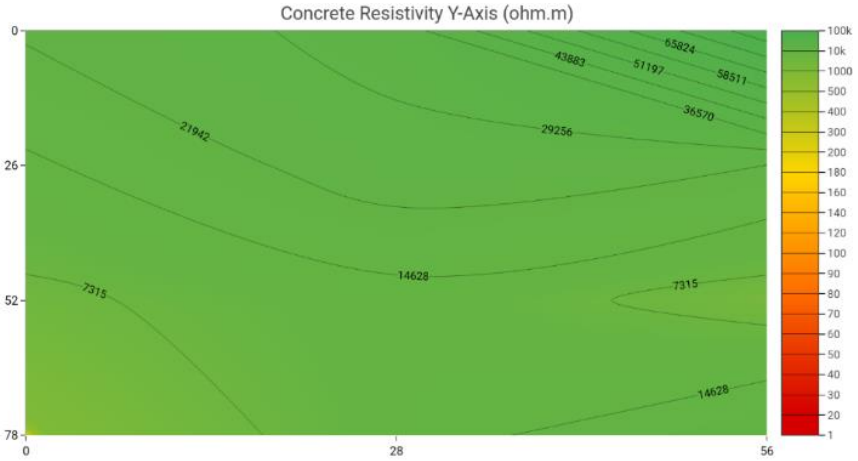


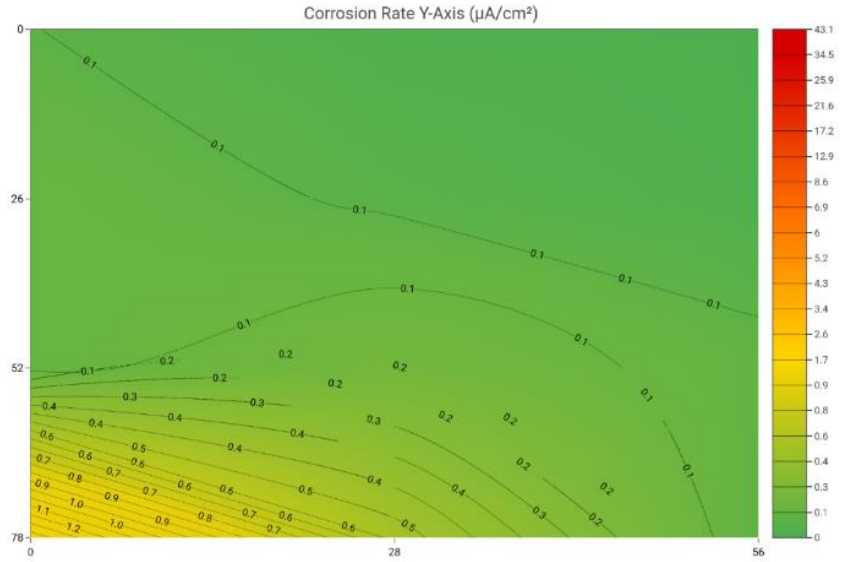
Figura 94 : Griglia PA2_Interno






Corrosion Rate X-Axis (µA/cm²)
0
26
52
78
0
28
56
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0


Concrete Resistivity Y-Axis (ohm.m)
0
26
52
78
0
28
56
65824
43883
51197
58511
36570
29256
21942
14628
7315
7315
14628
100k
10k
1000
500
400
300
200
180
160
140
120
100
90
80
70
60
50
40
30
20
1


Corrosion Rate Y-Axis (µA/cm²)
0
26
52
78
0
28
56
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0

- PA3_Esterno

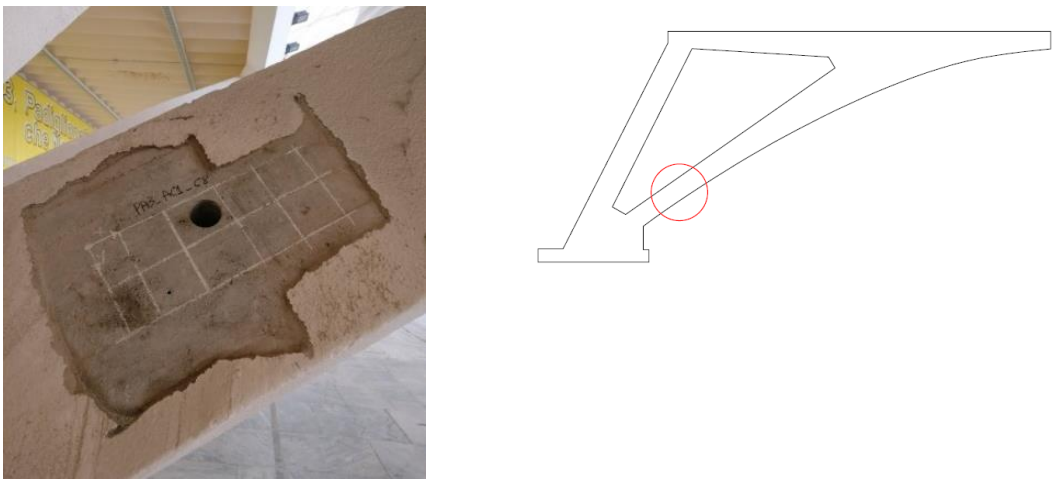
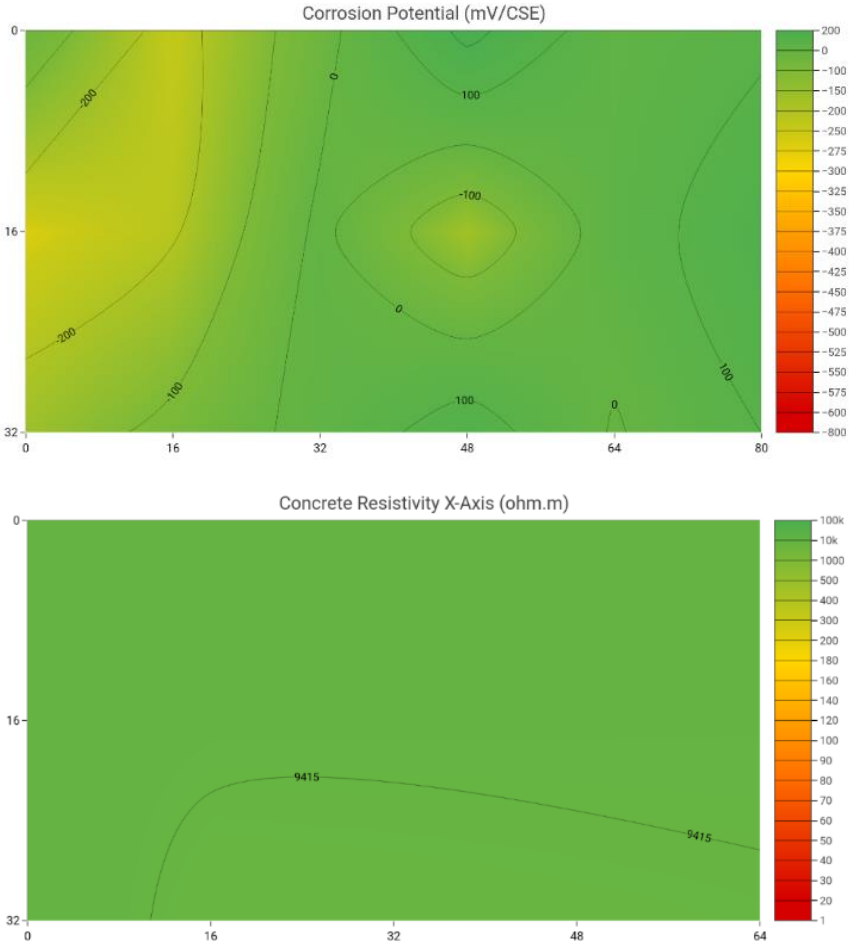
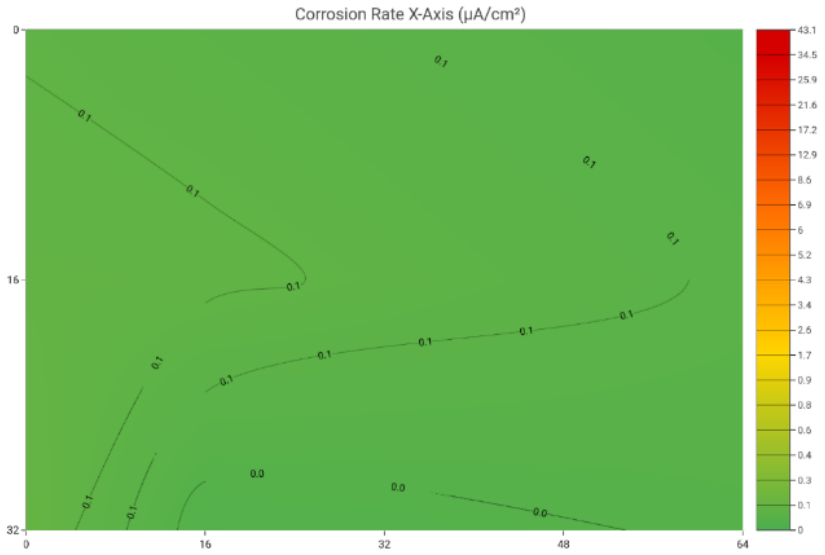
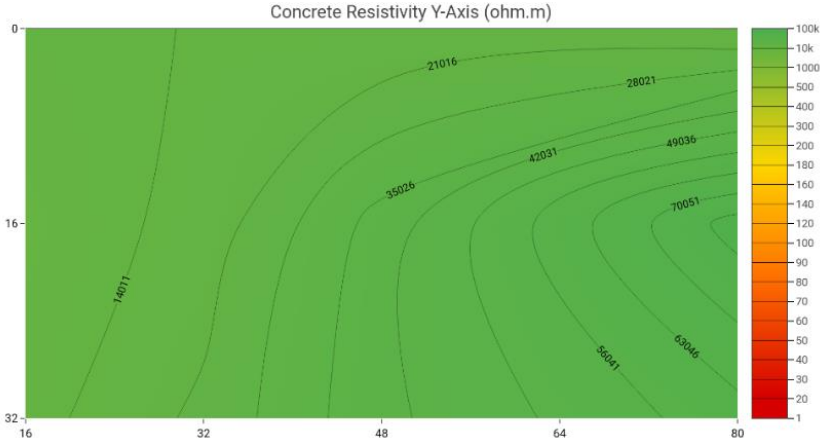
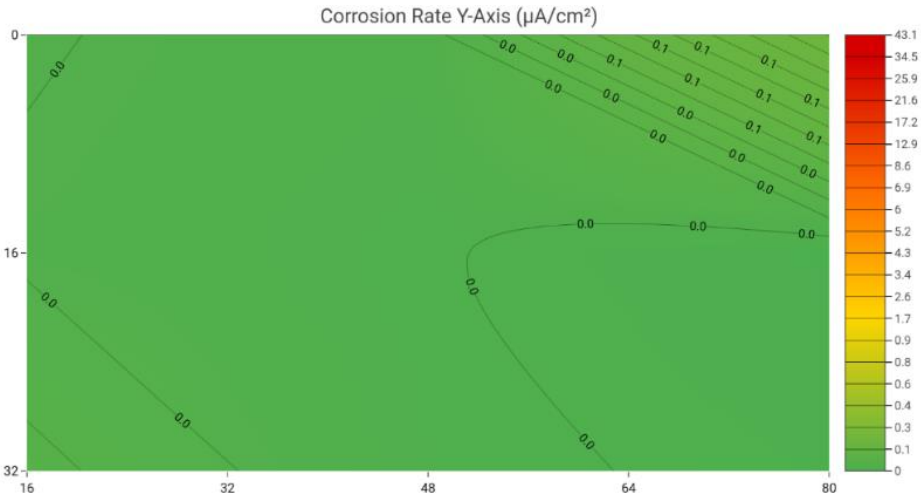


Figura 95 : Griglia PA3_Esterno




Corrosion Rate X-Axis (µA/cm²)
0
16
32
0
16
32
48
64
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0


Concrete Resistivity Y-Axis (ohm.m)
0
16
32
16
32
48
64
80
21016
28021
42031
49036
35026
70051
14017
58041
63046
100k
10k
1000
500
400
300
200
180
160
140
120
100
90
80
70
60
50
40
30
20
1


Corrosion Rate Y-Axis (µA/cm²)
0
16
32
16
32
48
64
80
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0

- PA4_Esterno

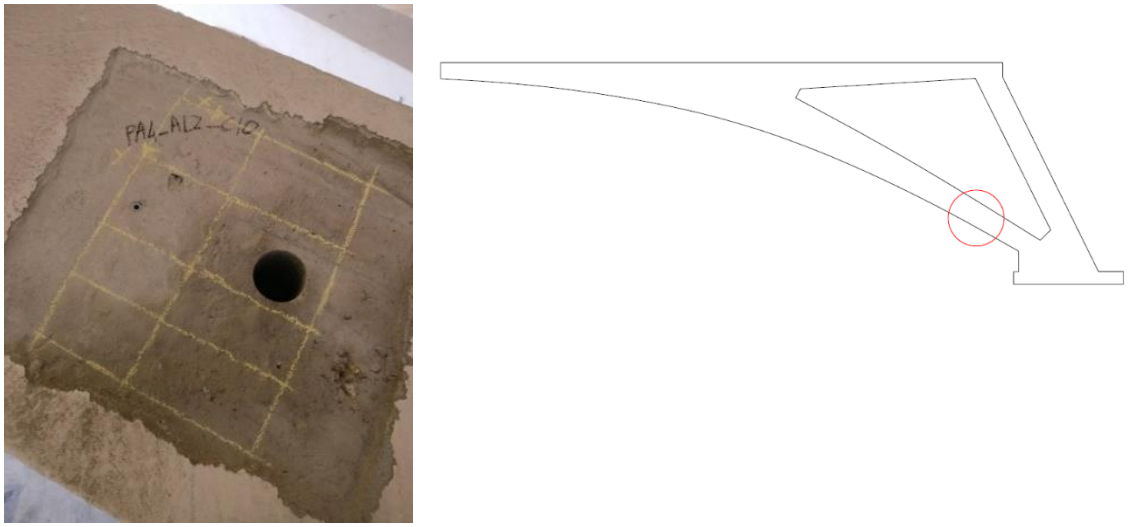
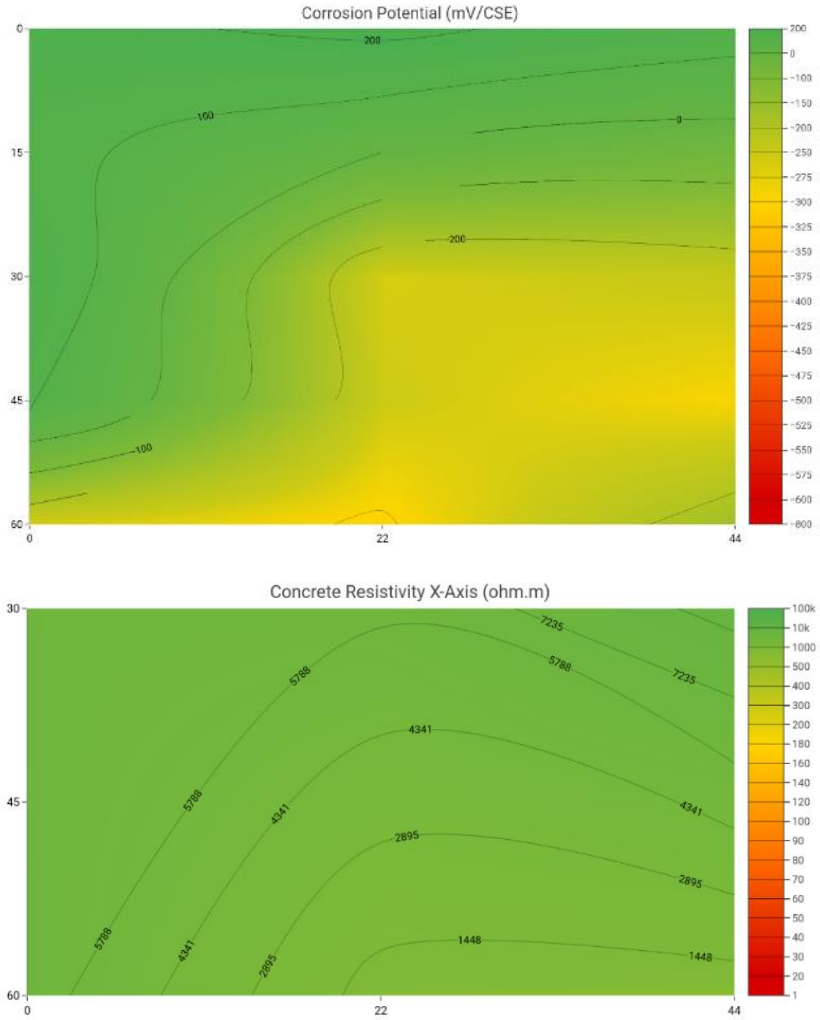
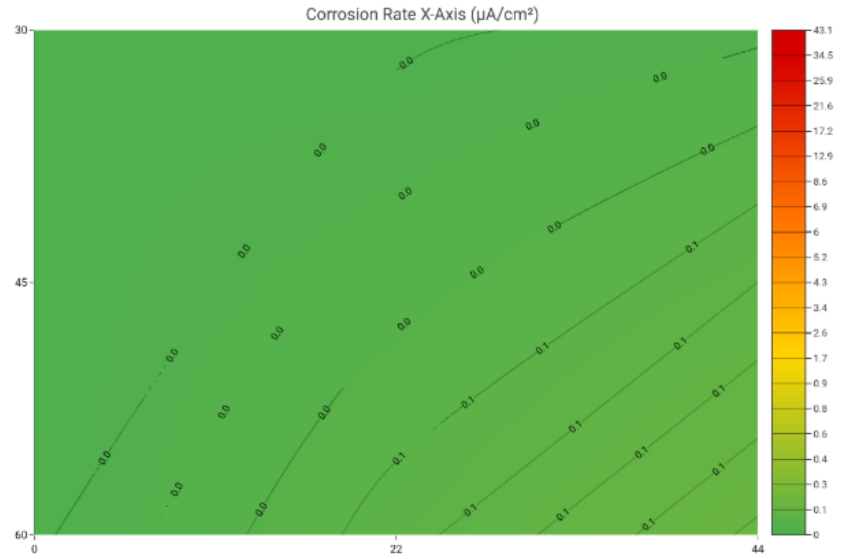
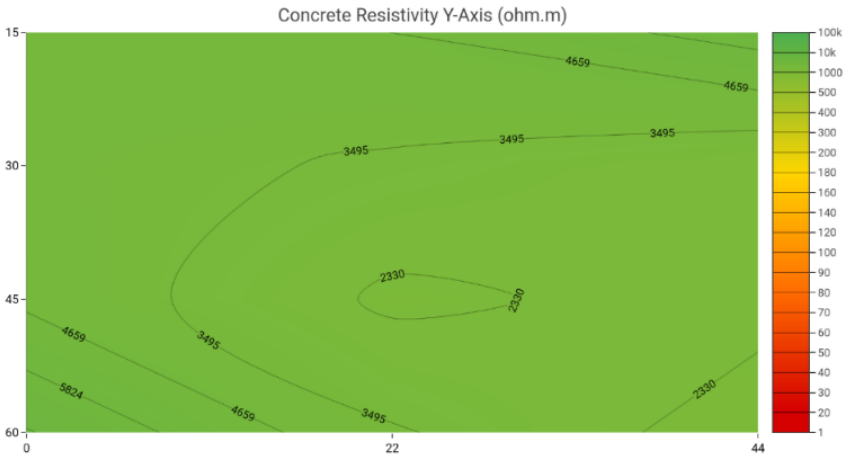
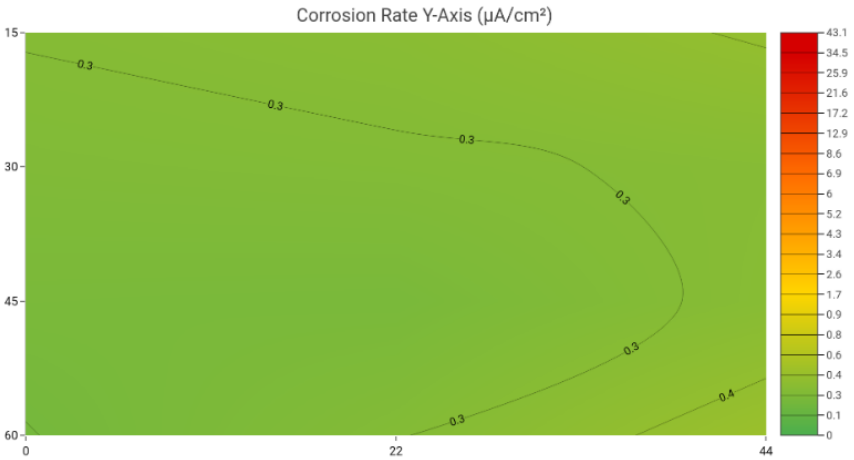


Figura 96 : Griglia Pa4_Esterno




Corrosion Rate X-Axis (µA/cm²)
30
45
60
0
22
44
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0


Concrete Resistivity Y-Axis (ohm.m)
15
30
45
60
0
22
44
4659
3495
2330
5824
100k
10k
1000
500
400
300
200
180
160
140
120
100
90
80
70
60
50
40
30
20
1


Corrosion Rate Y-Axis (µA/cm²)
15
30
45
60
0
22
44
0.3
0.4
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0

- *PA5_Esterno*

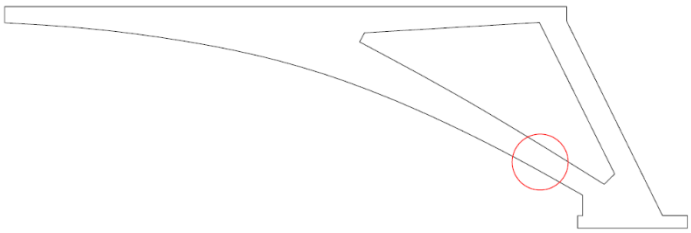
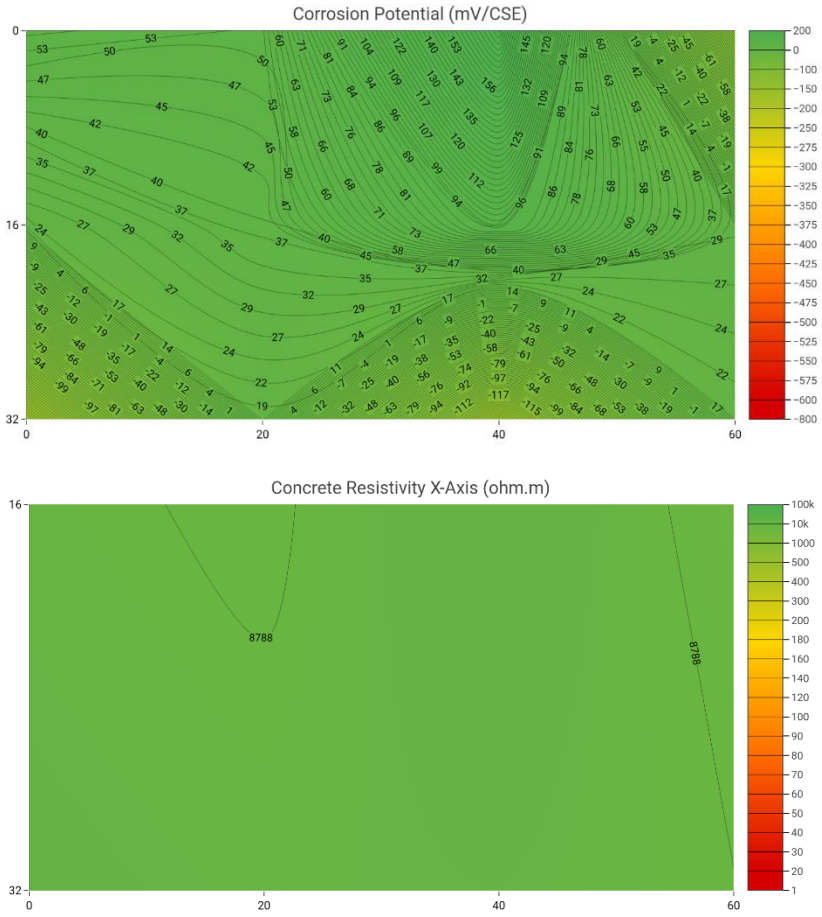
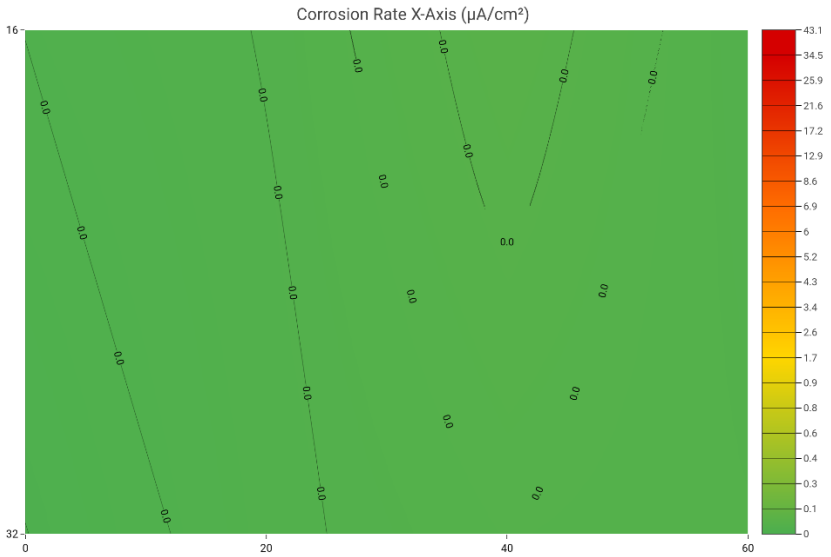
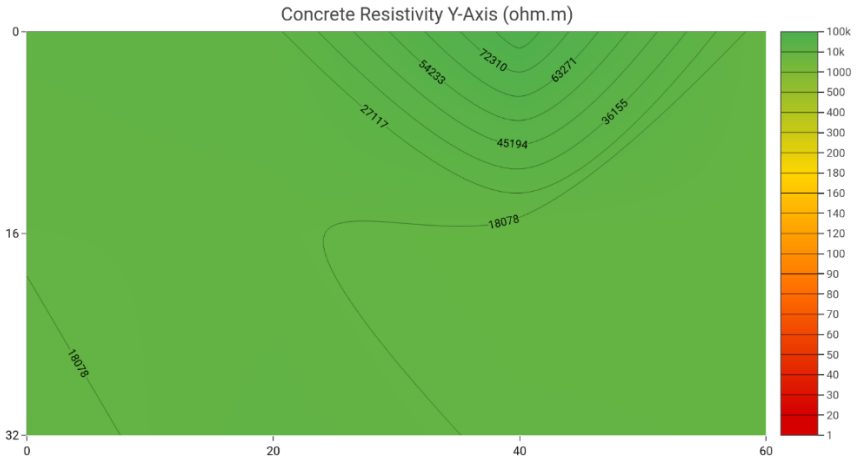
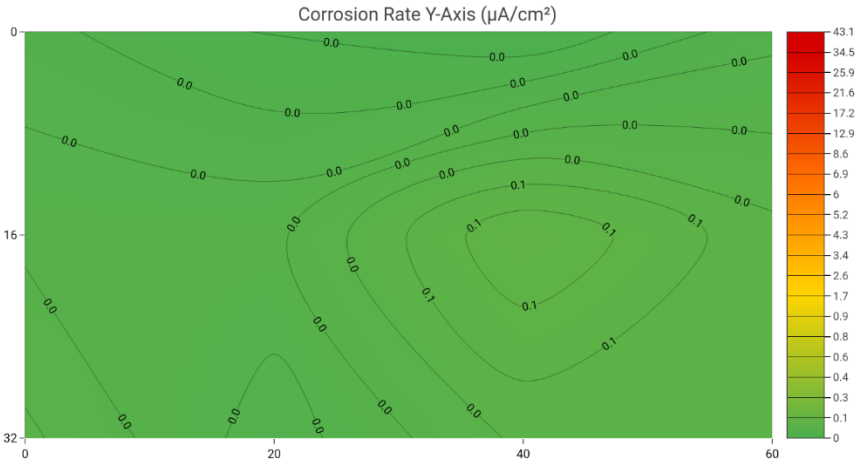


Figura 97 : Griglia PA5_Esterno




Corrosion Rate X-Axis (µA/cm²)
16
32
0
20
40
60
0.0
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0


Concrete Resistivity Y-Axis (ohm.m)
0
16
32
0
20
40
60
72310
63271
54233
36155
27117
45194
18078
18078
100k
10k
1000
500
400
300
200
180
160
140
120
100
90
80
70
60
50
40
30
20
1


Corrosion Rate Y-Axis (µA/cm²)
0
16
32
0
20
40
60
0.0
0.1
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0

- *PA6_Esterno*

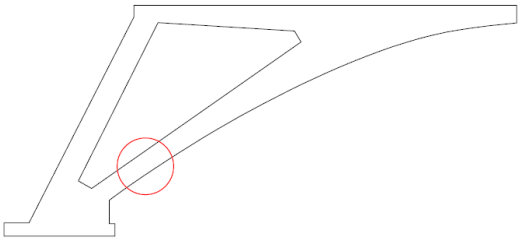
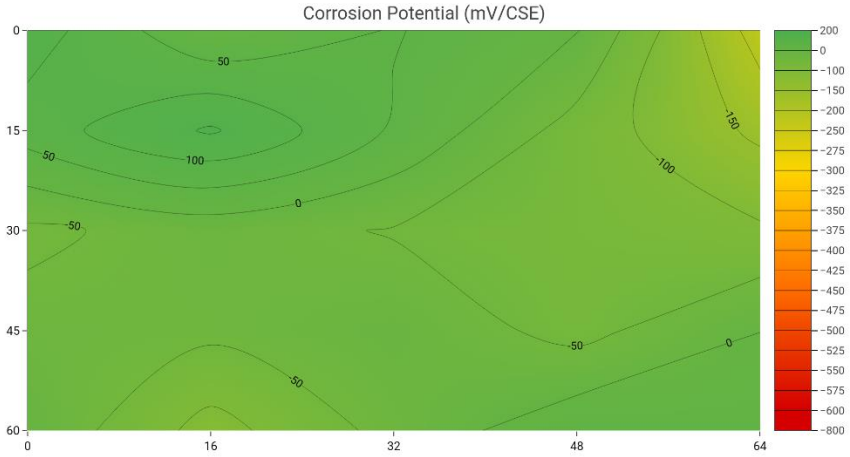
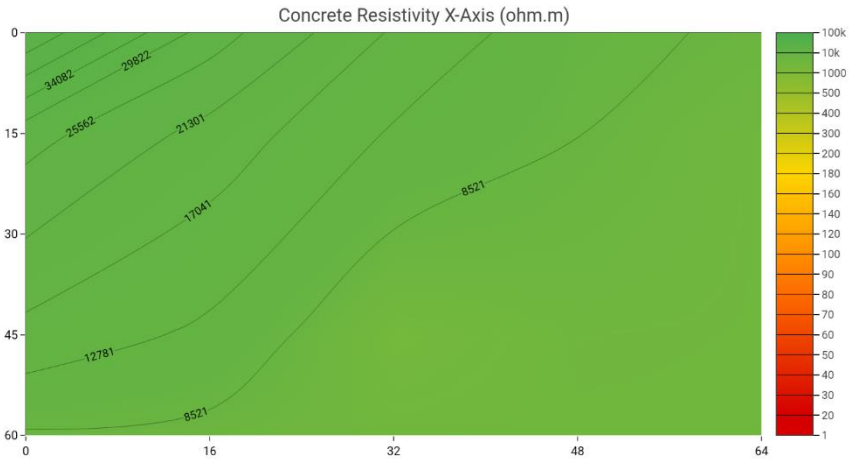
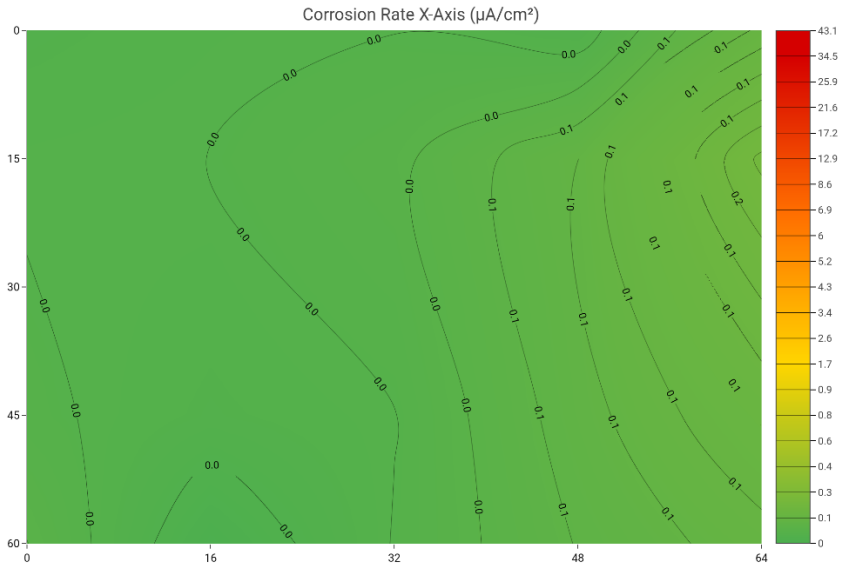
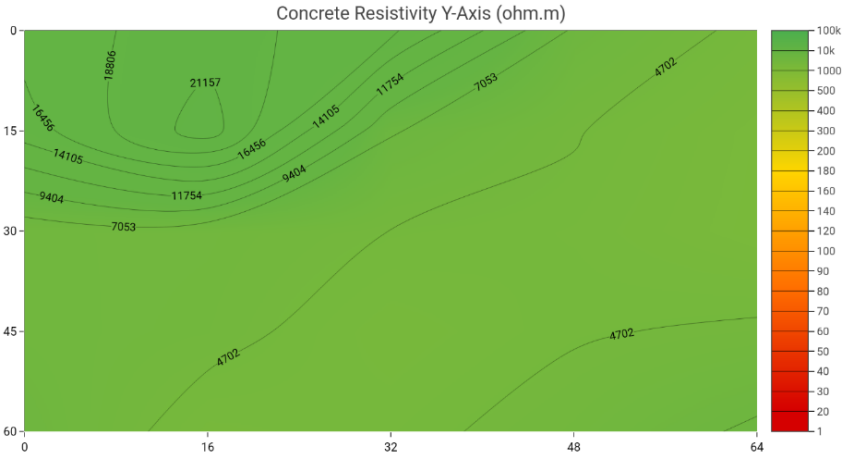


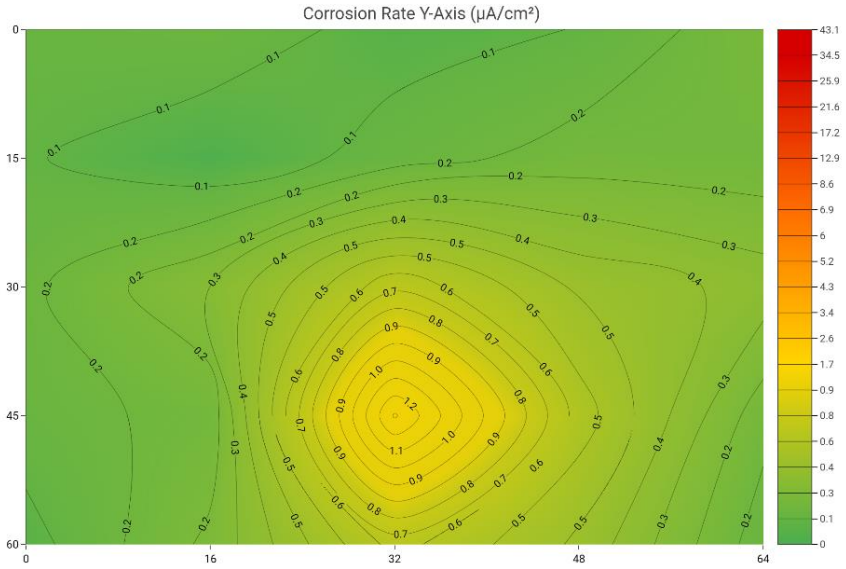
Figura 98 : Griglia PA6_Esterno






Corrosion Rate X-Axis (µA/cm²)
0
15
30
45
60
0
16
32
48
64
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0


Concrete Resistivity Y-Axis (ohm.m)
0
15
30
45
60
0
16
32
48
64
100k
10k
1000
500
400
300
200
180
160
140
120
100
90
80
70
60
50
40
30
20
1
18806
21157
16456
14105
11754
9404
7053
4702


Corrosion Rate Y-Axis (µA/cm²)
0
15
30
45
60
0
16
32
48
64
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0

- *PA7_Esterno*

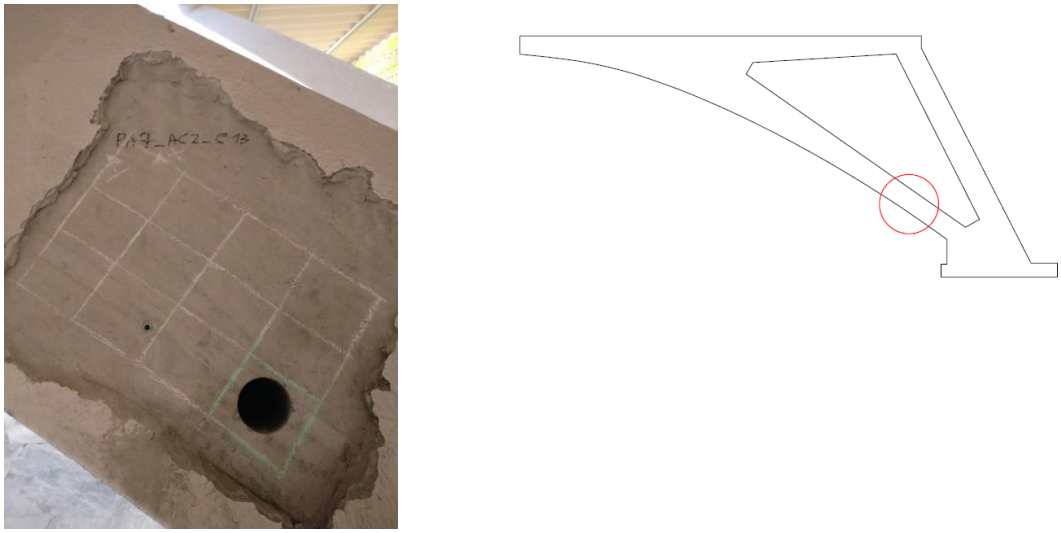
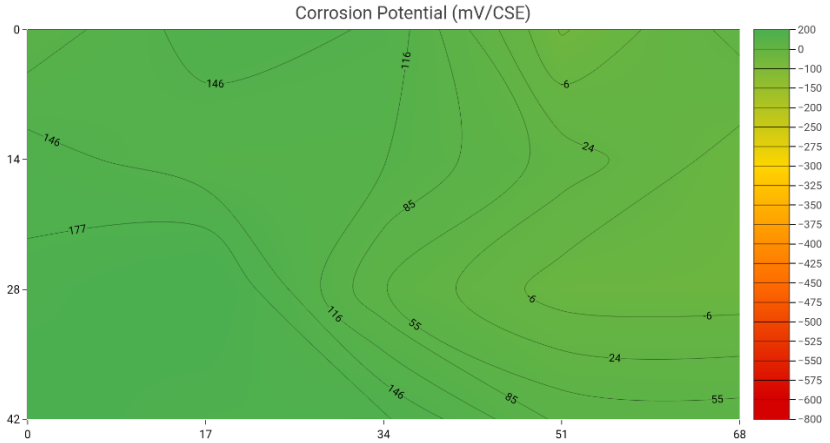
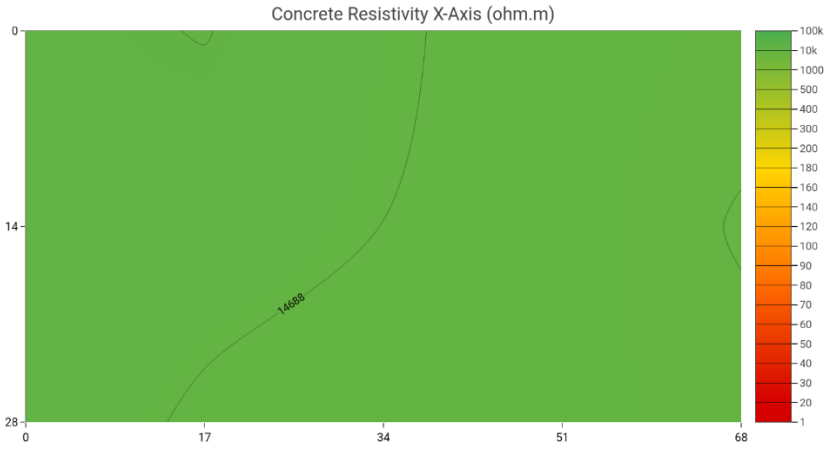
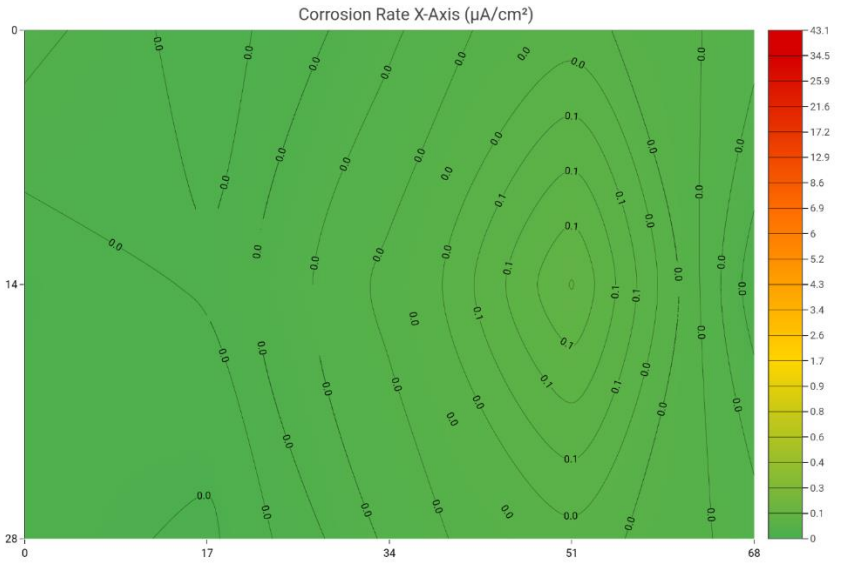
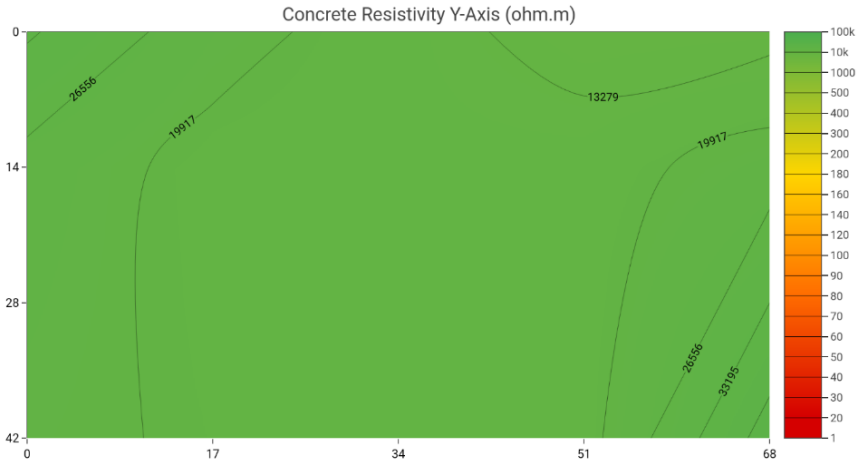


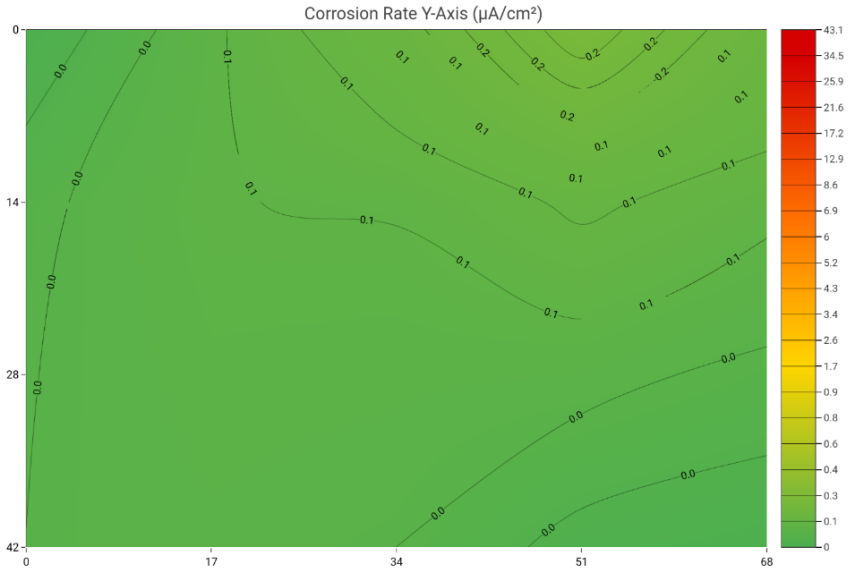
Figura 99 : Griglia PA7_Esterno






Corrosion Rate X-Axis (µA/cm²)
0
14
28
0
17
34
51
68
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0


Concrete Resistivity Y-Axis (ohm.m)
0
14
28
42
0
17
34
51
68
26556
19917
13279
19917
26556
33195
100k
10k
1000
500
400
300
200
180
160
140
120
100
90
80
70
60
50
40
30
20
1


Corrosion Rate Y-Axis (µA/cm²)
0
14
28
42
0
17
34
51
68
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0

- *PA8_Esterno*

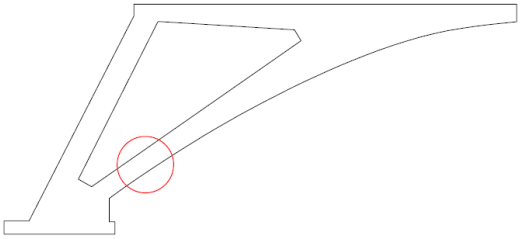
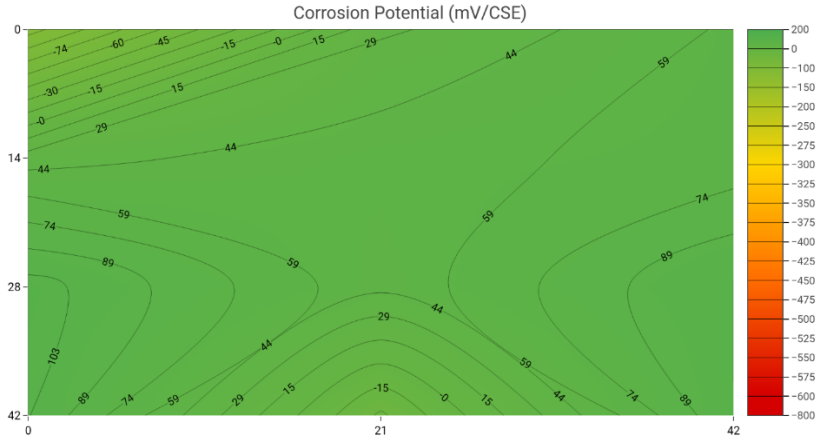
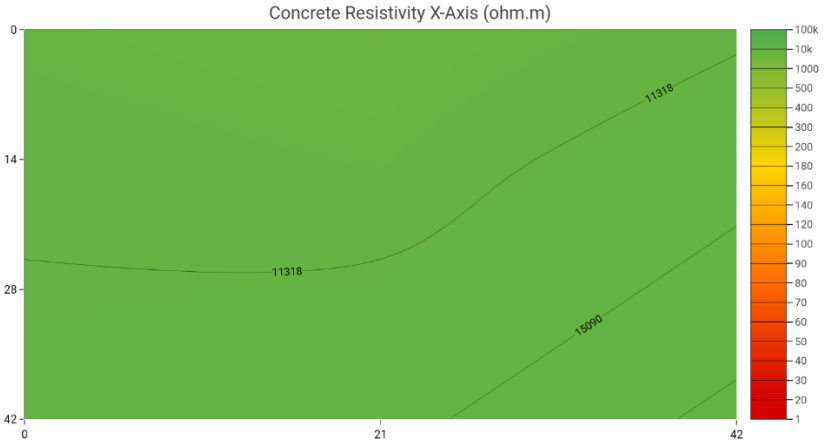
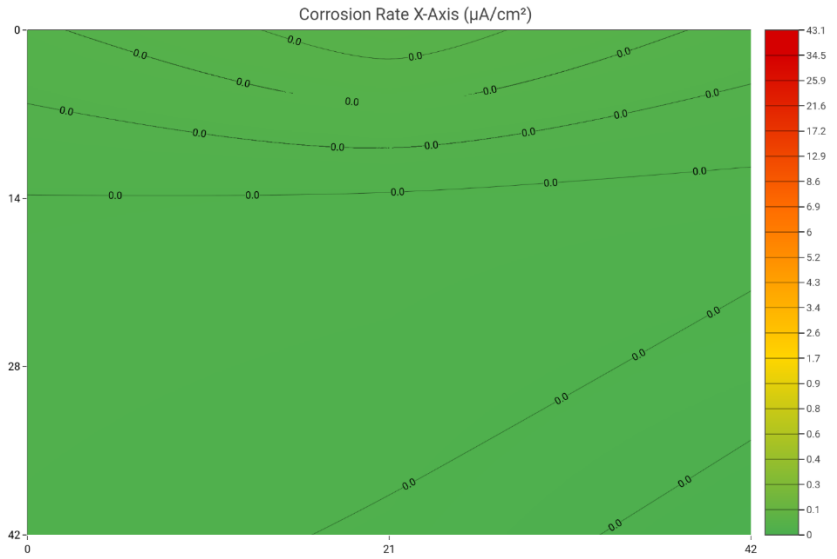
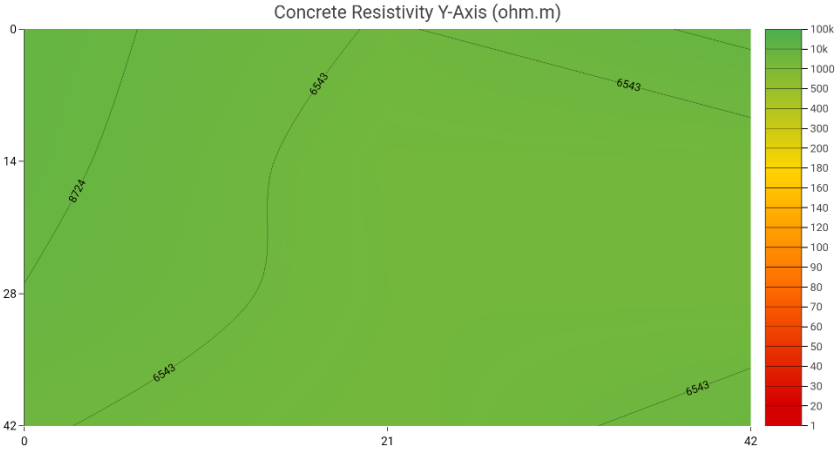


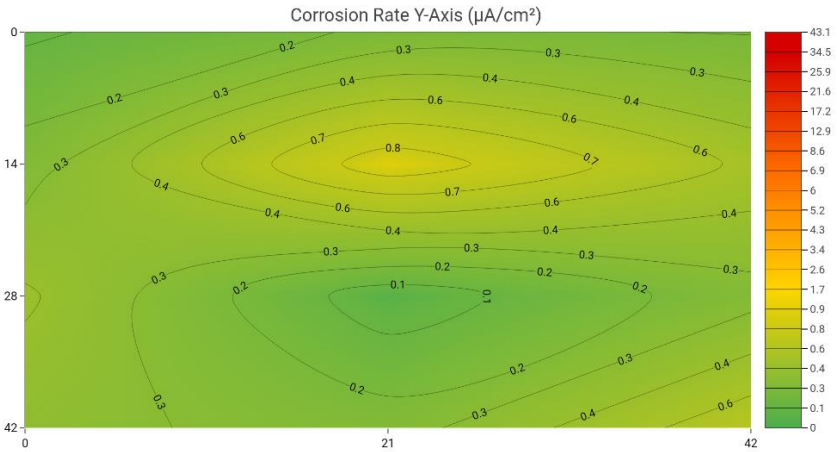
Figura 100 : Griglia PA8_Esterno





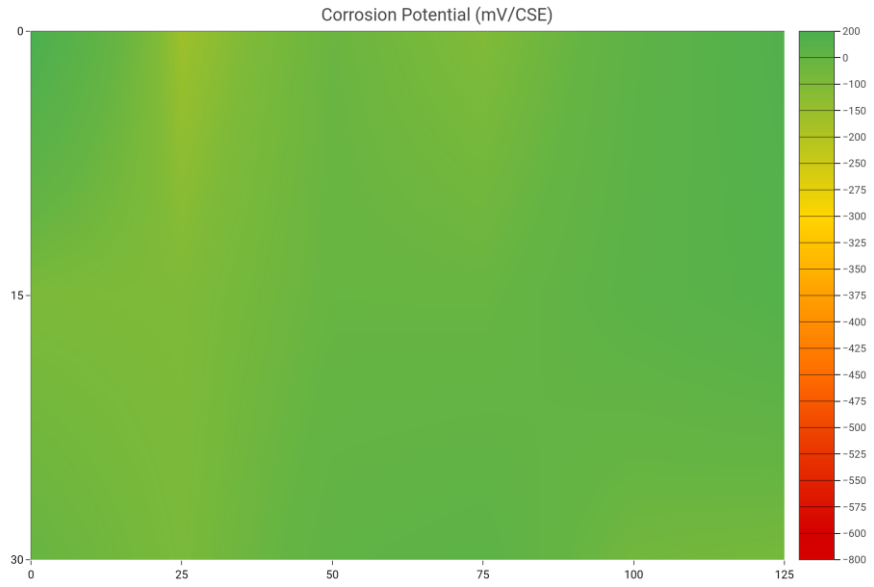

Corrosion Rate X-Axis (µA/cm²)
0
14
28
42
0
21
42
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0

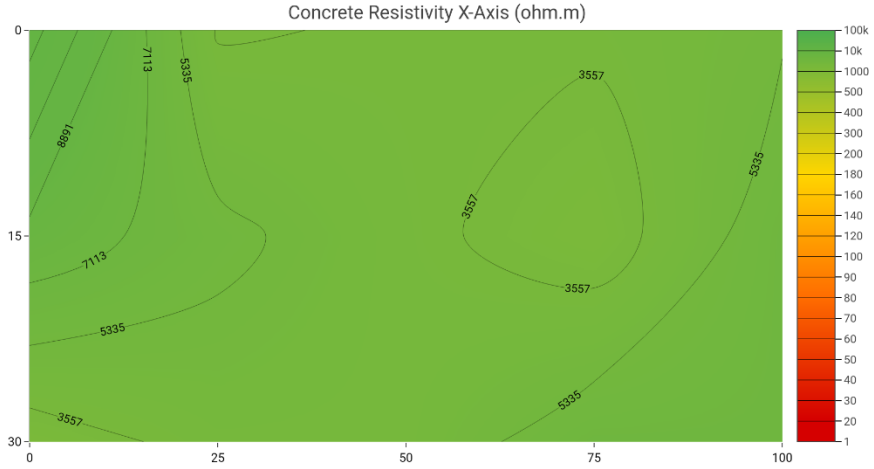

Concrete Resistivity Y-Axis (ohm.m)
0
14
28
42
0
21
42
6543
8724
100k
10k
1000
500
400
300
200
180
160
140
120
100
90
80
70
60
50
40
30
20
1

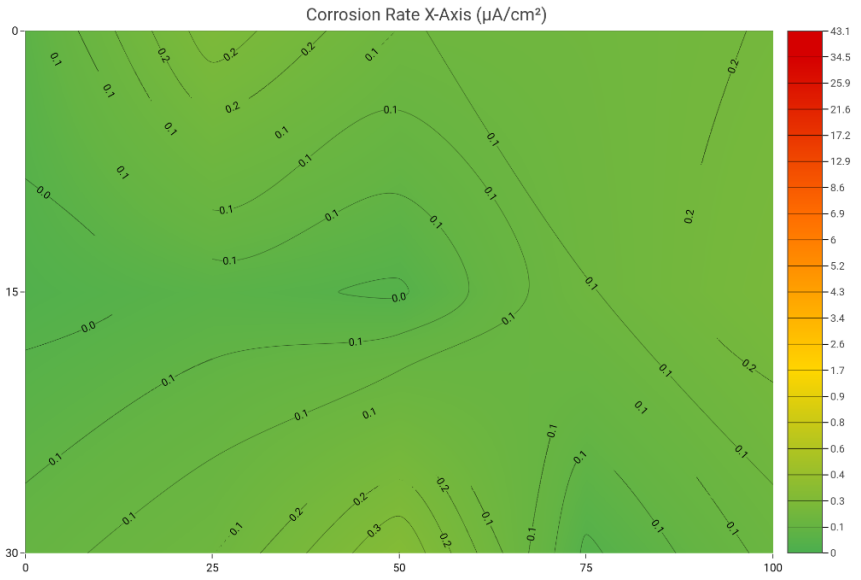

Corrosion Rate Y-Axis (µA/cm²)
0
14
28
42
0
21
42
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0

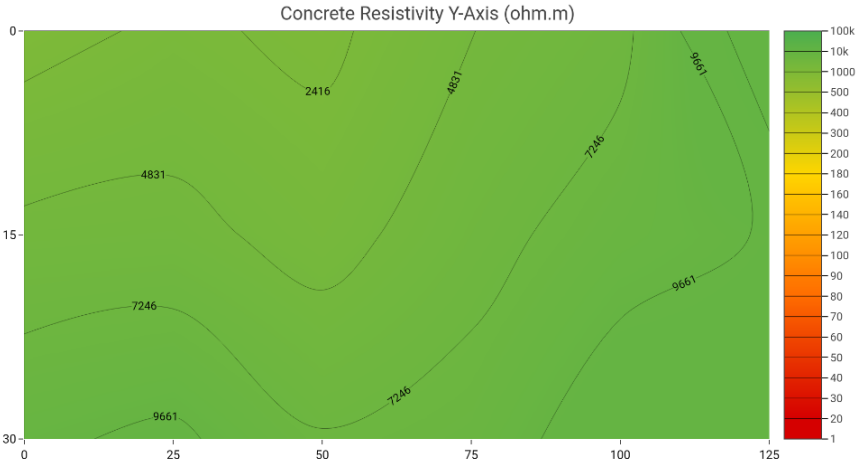
- *PC1_Base*

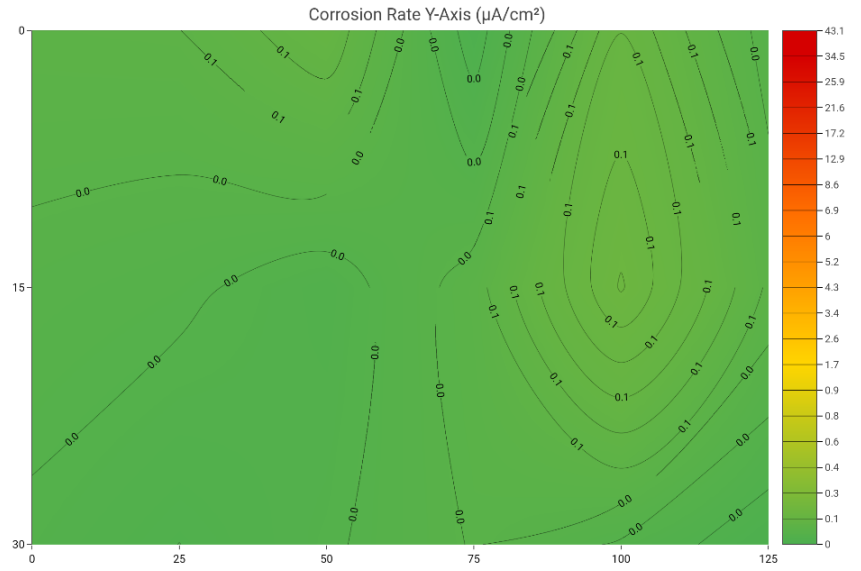
Figura 101 : Griglia PC1_Base






Corrosion Rate X-Axis (µA/cm²)
0
15
30
0
25
50
75
100
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0


Concrete Resistivity Y-Axis (ohm.m)
0
15
30
0
25
50
75
100
125
2416
4831
7246
9661
100k
10k
1000
500
400
300
200
180
160
140
120
100
90
80
70
60
50
40
30
20
1


Corrosion Rate Y-Axis (µA/cm²)
0
15
30
0
25
50
75
100
125
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0

- *PC1_Base Dx*

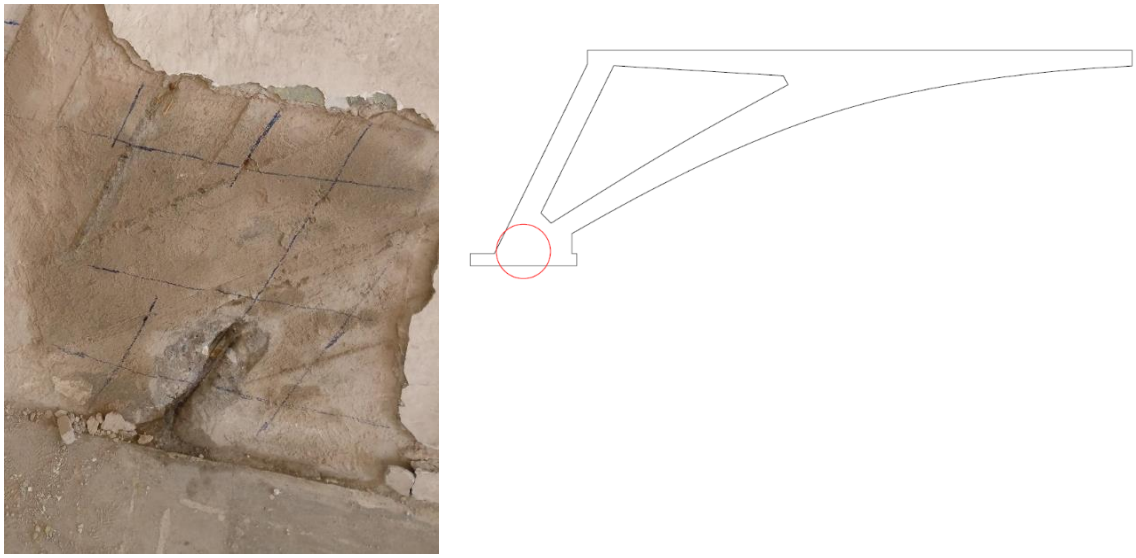
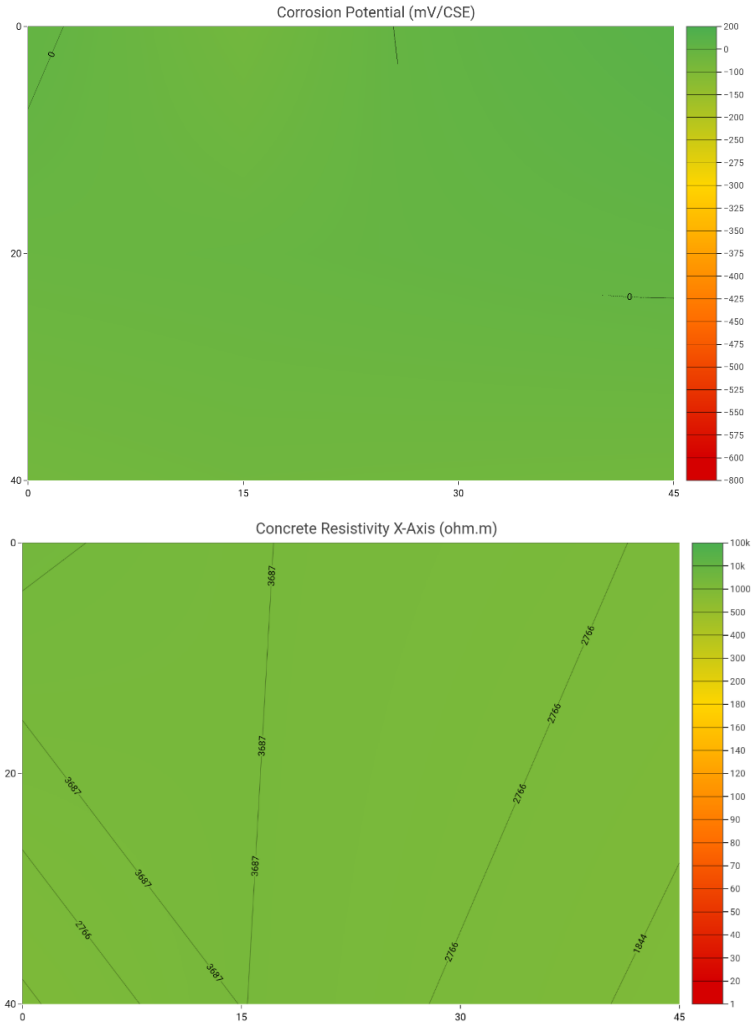
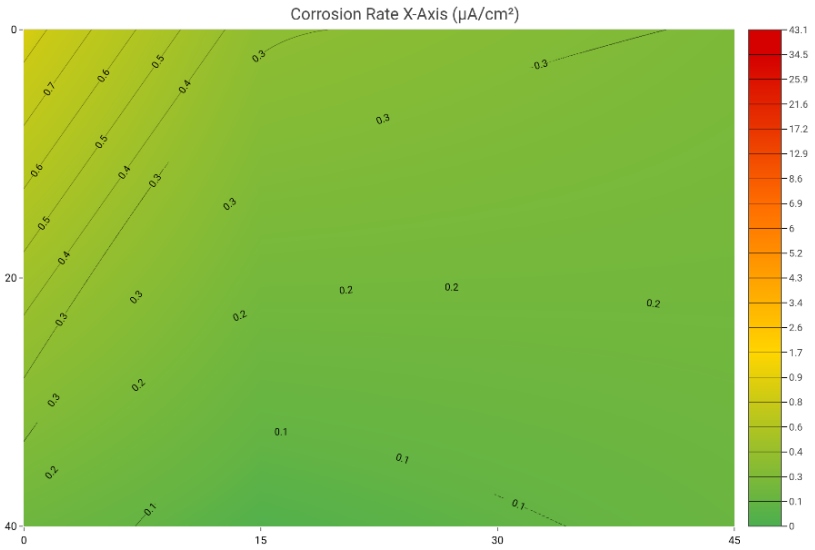
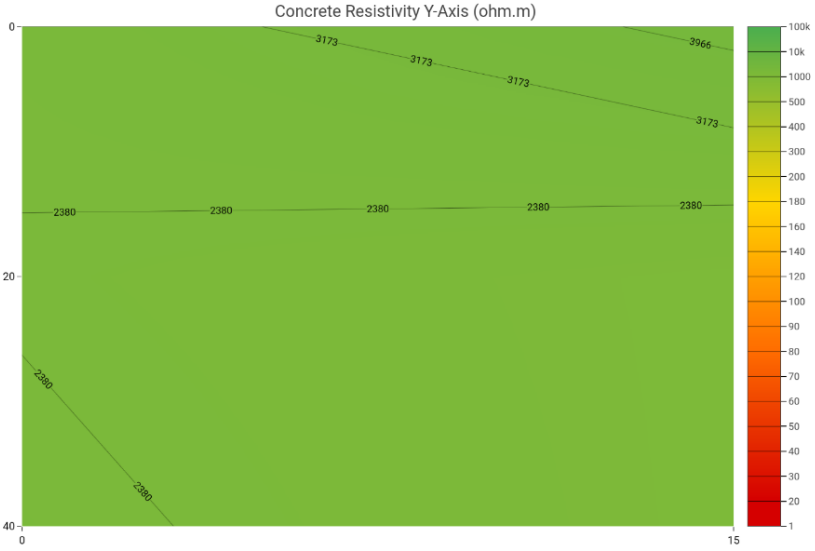
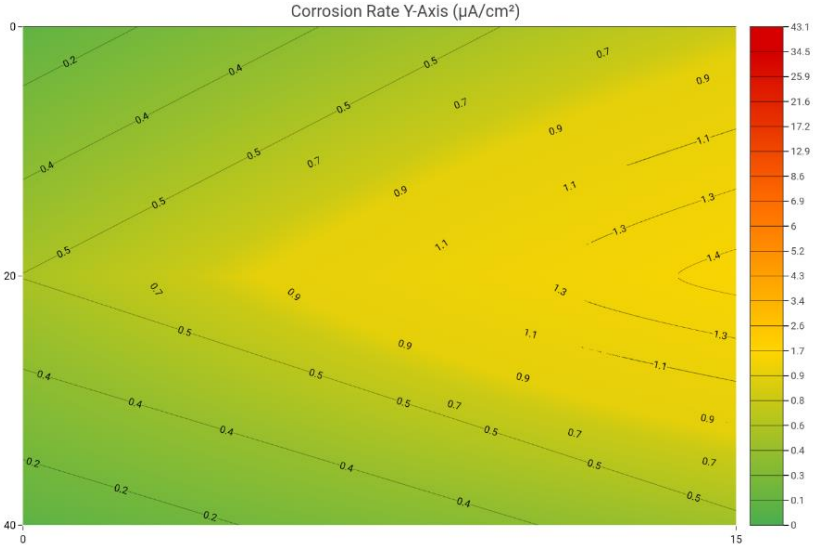


Figura 102 : Griglia PC1_Base dx




Corrosion Rate X-Axis (µA/cm²)
0
20
40
0
15
30
45
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0


Concrete Resistivity Y-Axis (ohm.m)
0
20
40
0
15
100k
10k
1000
500
400
300
200
180
160
140
120
100
90
80
70
60
50
40
30
20
1


Corrosion Rate Y-Axis (µA/cm²)
0
20
40
0
15
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0

- *PC1_Base Sx*

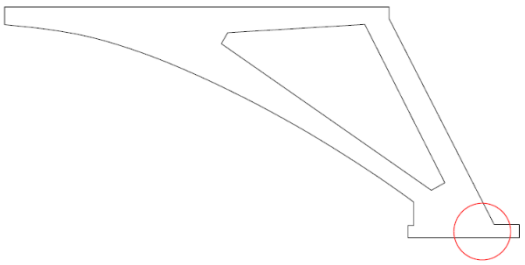
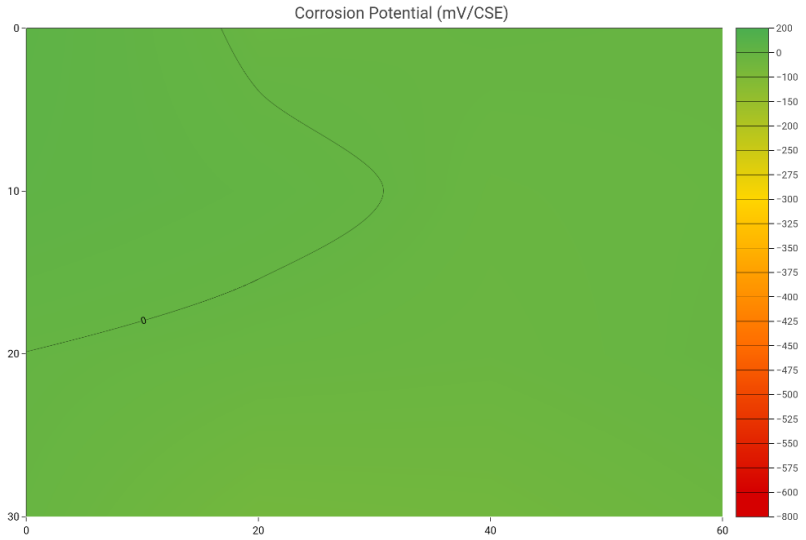
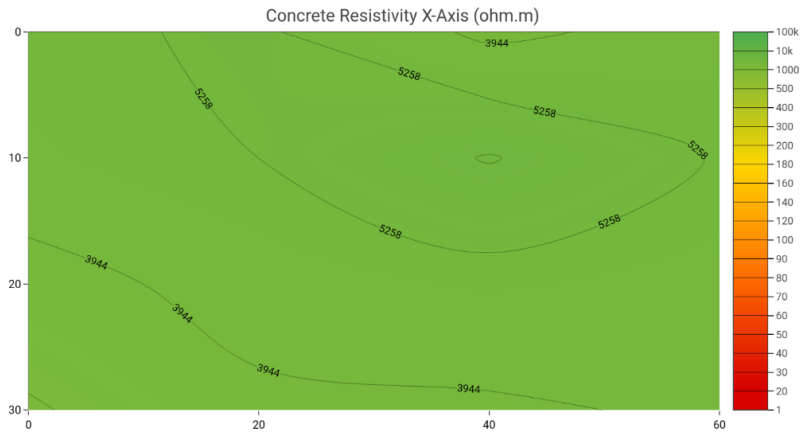
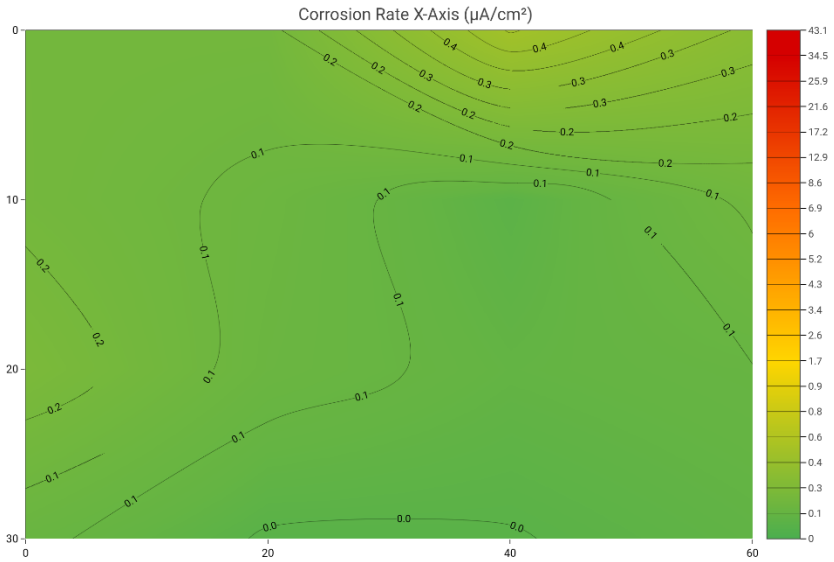
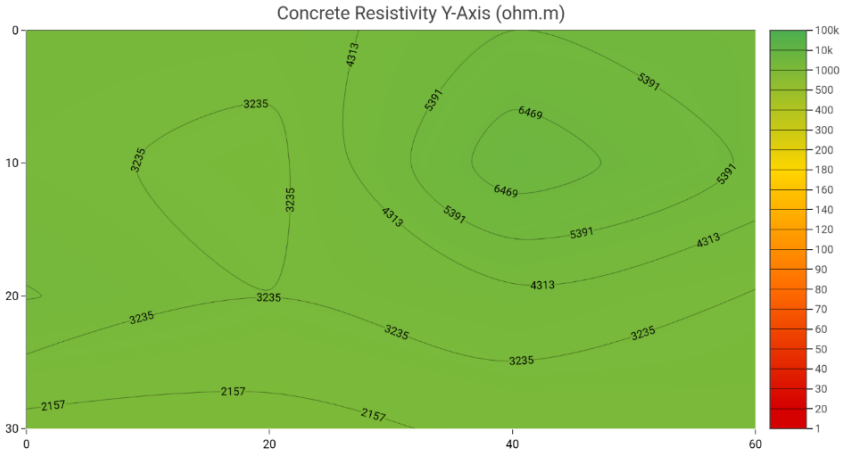


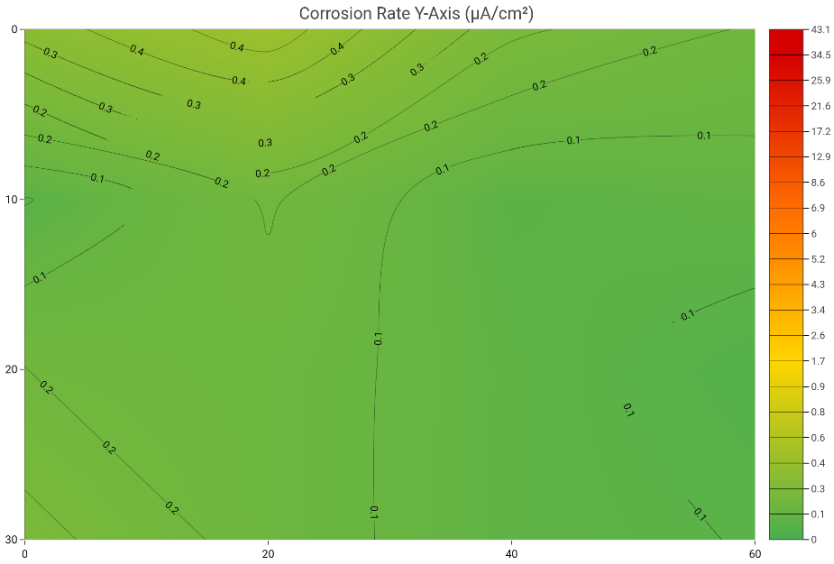
Figura 103 : Griglia PC1_Base sx






Corrosion Rate X-Axis (µA/cm²)
0
10
20
30
0
20
40
60
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0


Concrete Resistivity Y-Axis (ohm.m)
0
10
20
30
0
20
40
60
100k
10k
1000
500
400
300
200
180
160
140
120
100
90
80
70
60
50
40
30
20
1
3235
4313
5391
6469
2157


Corrosion Rate Y-Axis (µA/cm²)
0
10
20
30
0
20
40
60
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0

- *PC1_Esterno dx*

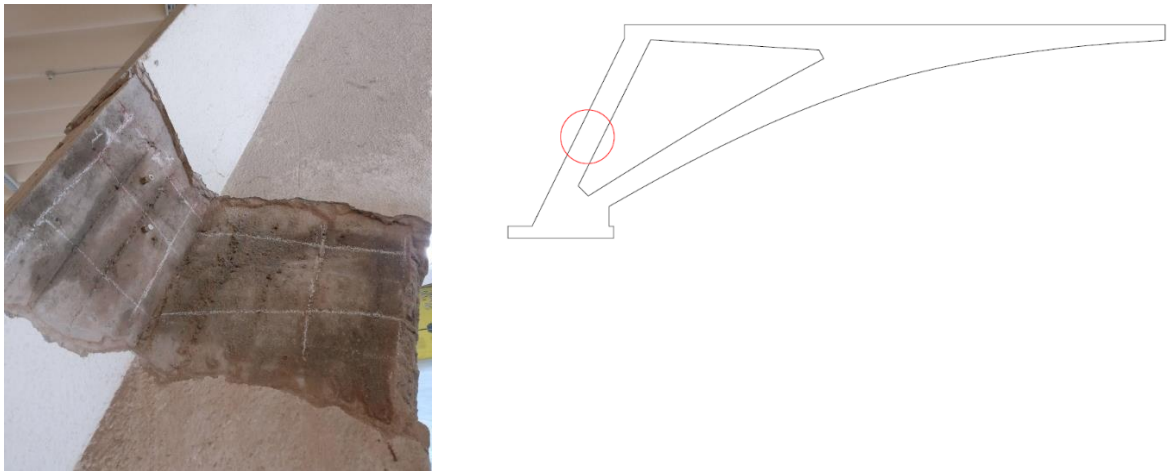
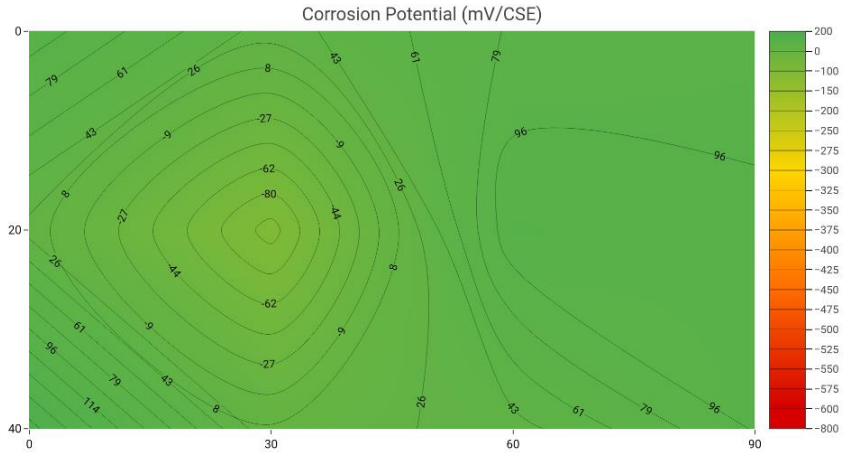
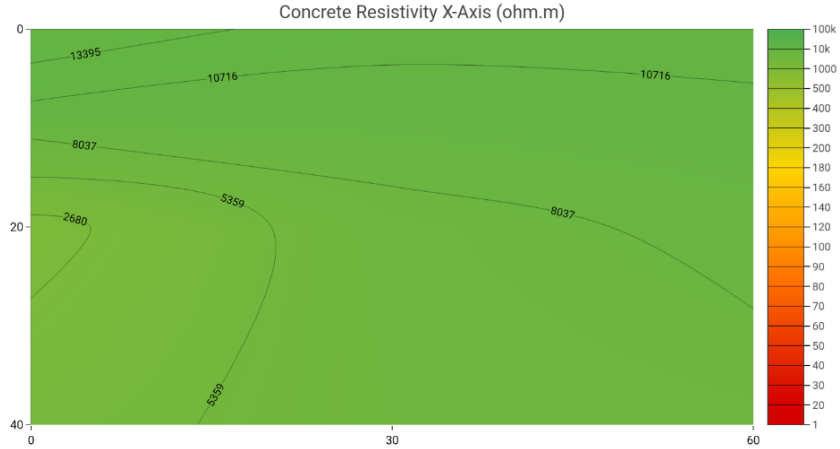
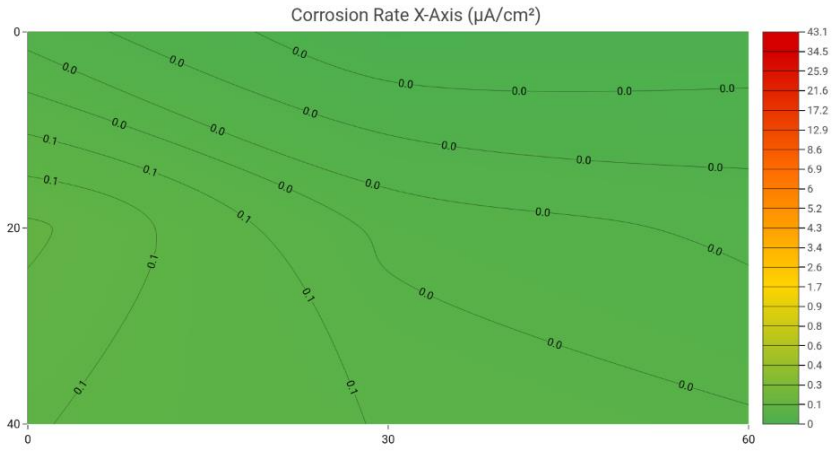
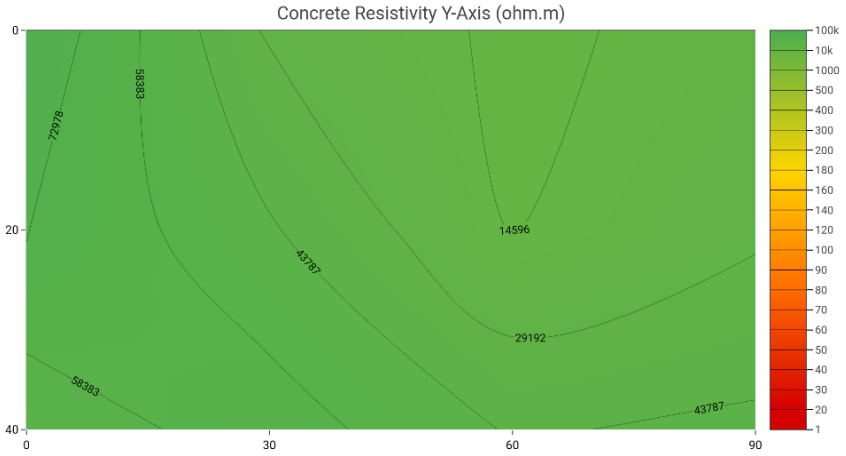


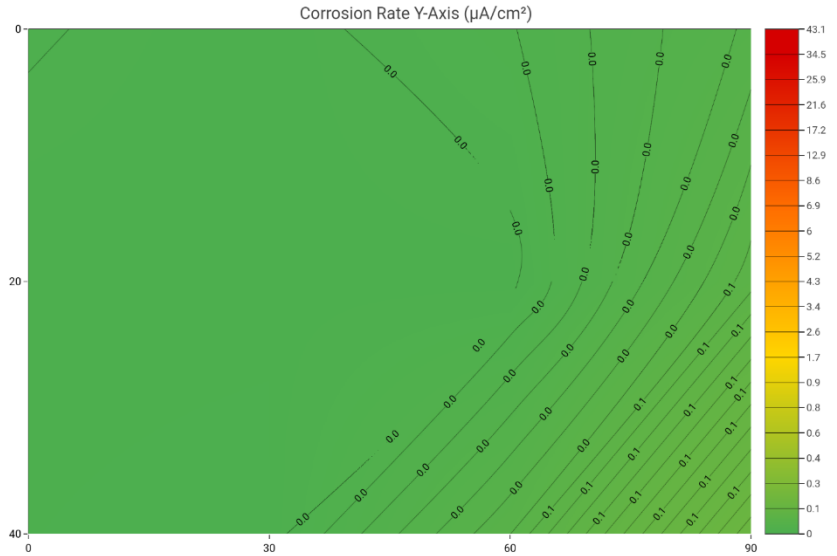
Figura 104 : Griglia PC1_Esterno dx






Corrosion Rate X-Axis (µA/cm²)
0
20
40
0
30
60
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0


Concrete Resistivity Y-Axis (ohm.m)
0
20
40
0
30
60
90
72978
58383
14596
43787
29192
58383
43787
100k
10k
1000
500
400
300
200
180
160
140
120
100
90
80
70
60
50
40
30
20
1


Corrosion Rate Y-Axis (µA/cm²)
0
20
40
0
30
60
90
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0

- *PC1_Esterno Sx*

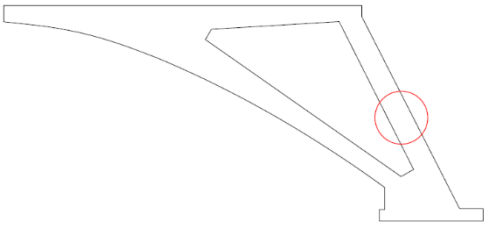
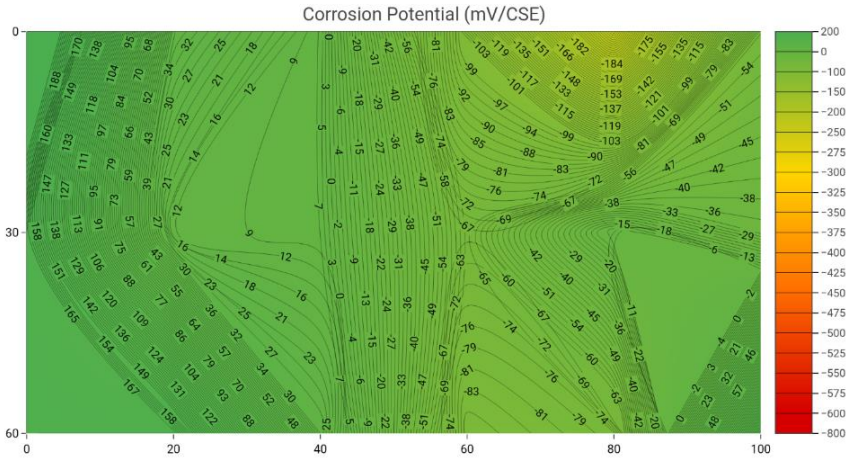
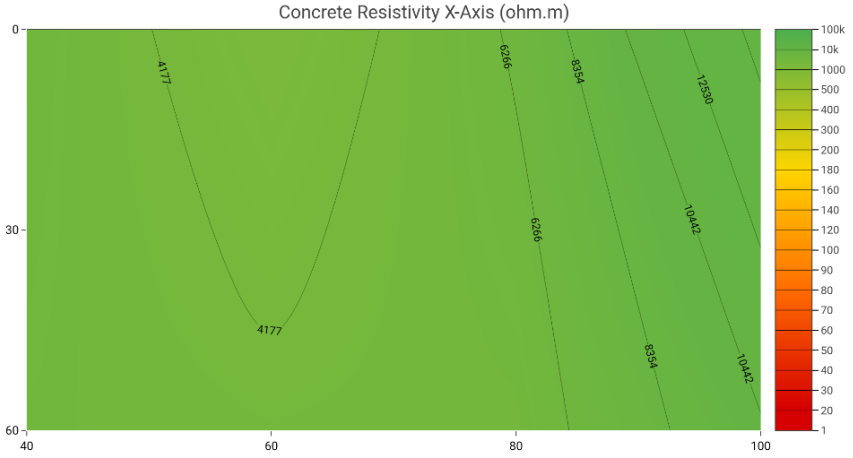
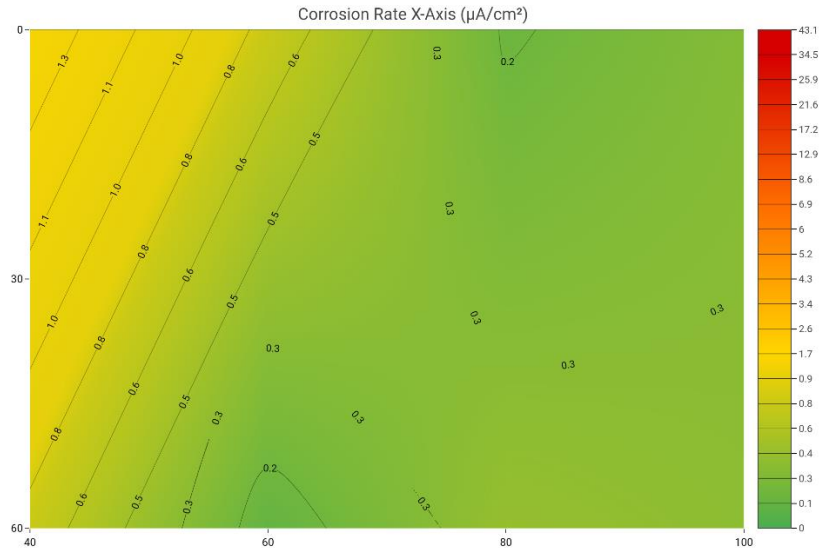
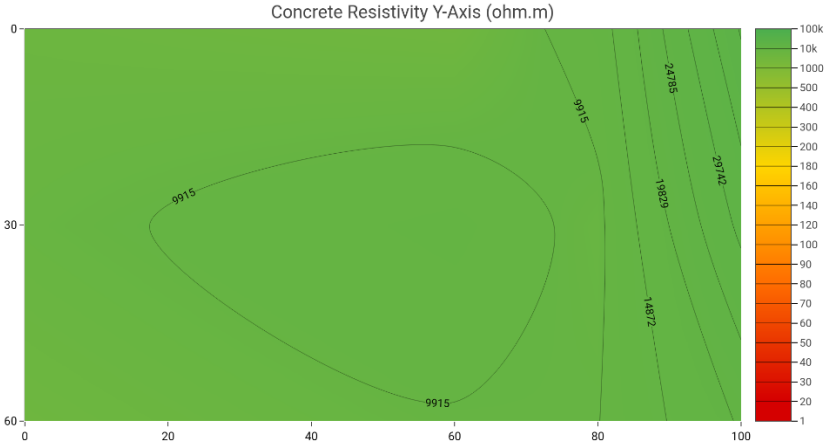


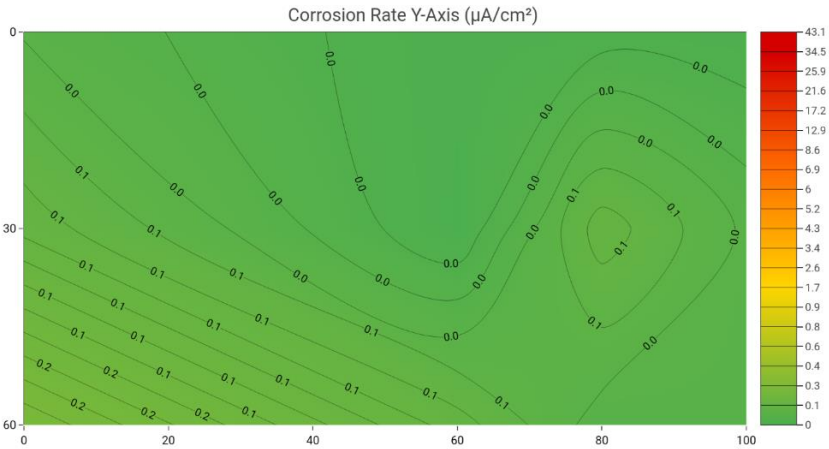
Figura 105 : Griglia PC1_Esterno Sx






Corrosion Rate X-Axis (µA/cm²)
0
30
60
40
60
80
100
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0


Concrete Resistivity Y-Axis (ohm.m)
0
30
60
0
20
40
60
80
100
9915
24785
29742
19829
14872
100k
10k
1000
500
400
300
200
180
160
140
120
100
90
80
70
60
50
40
30
20
1


Corrosion Rate Y-Axis (µA/cm²)
0
30
60
0
20
40
60
80
100
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0

- *PC2_Esterno Sx*

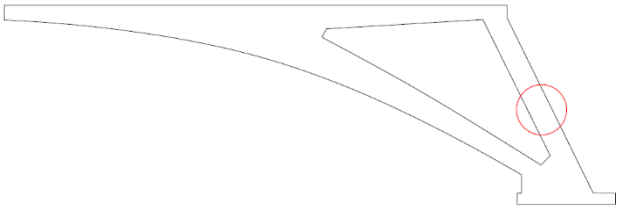
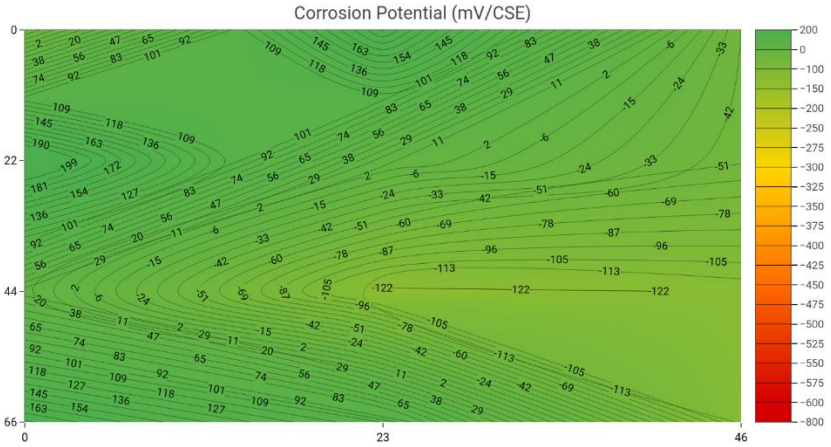
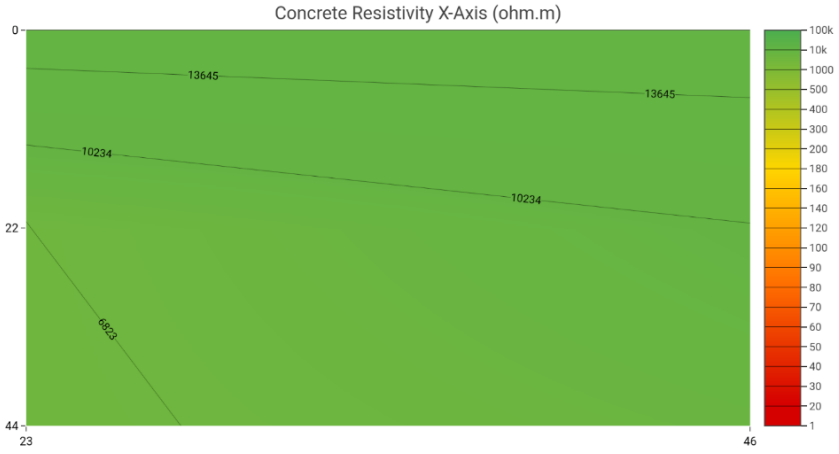
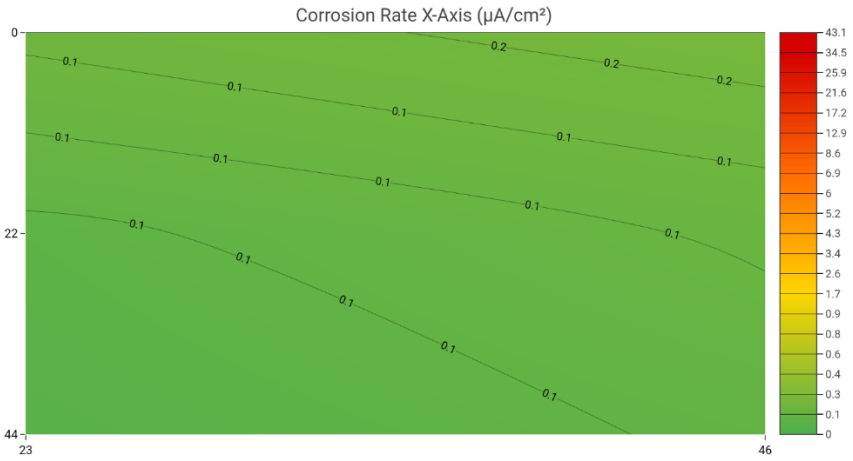
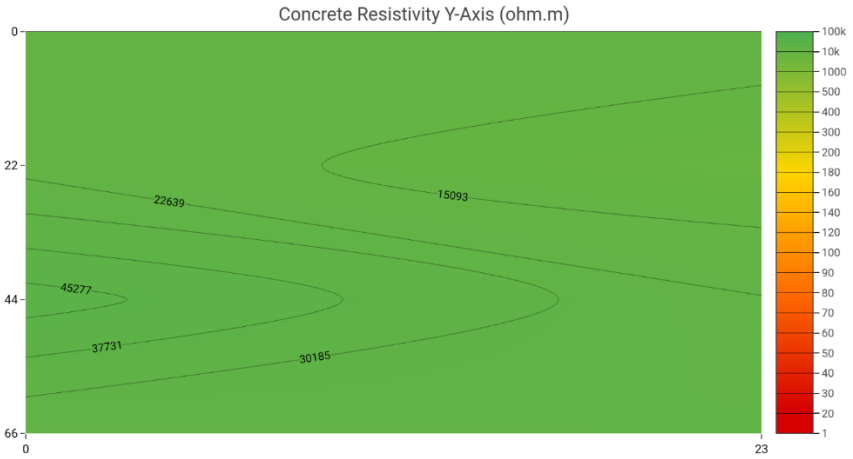


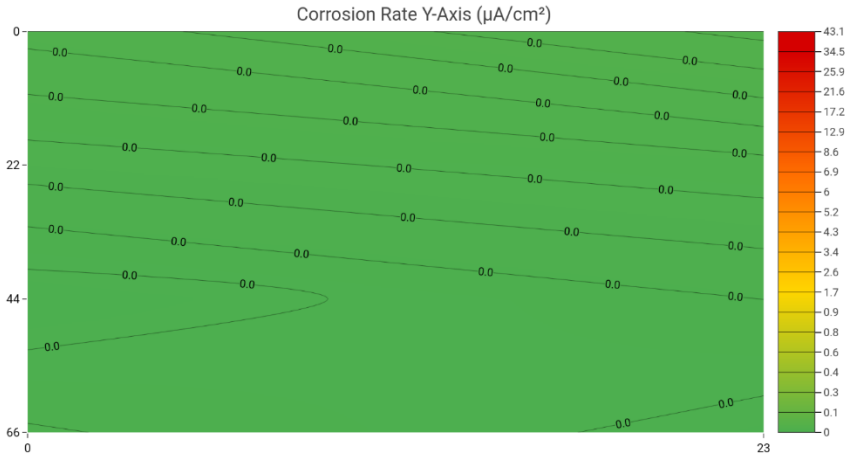
Figura 106 : Griglia PC2_Esterno sx






Corrosion Rate X-Axis (µA/cm²)
0
22
44
23
46
0.1
0.2
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0


Concrete Resistivity Y-Axis (ohm.m)
0
22
44
66
0
23
22639
15093
45277
37731
30185
100k
10k
1000
500
400
300
200
180
160
140
120
100
90
80
70
60
50
40
30
20
1


Corrosion Rate Y-Axis (µA/cm²)
0
22
44
66
0
23
0.0
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0

- *PC3_Esterno Sx*

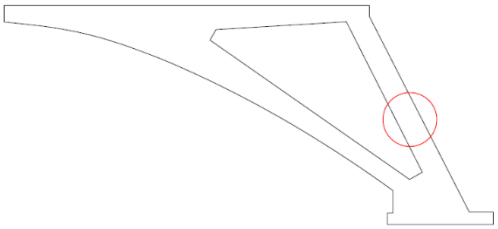
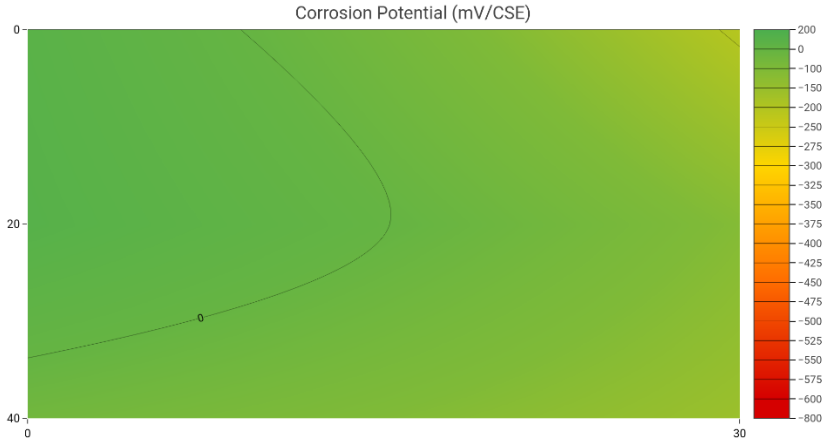
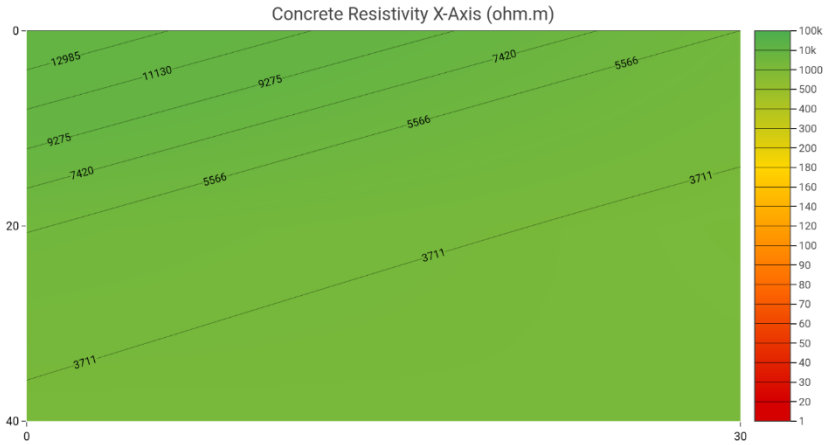
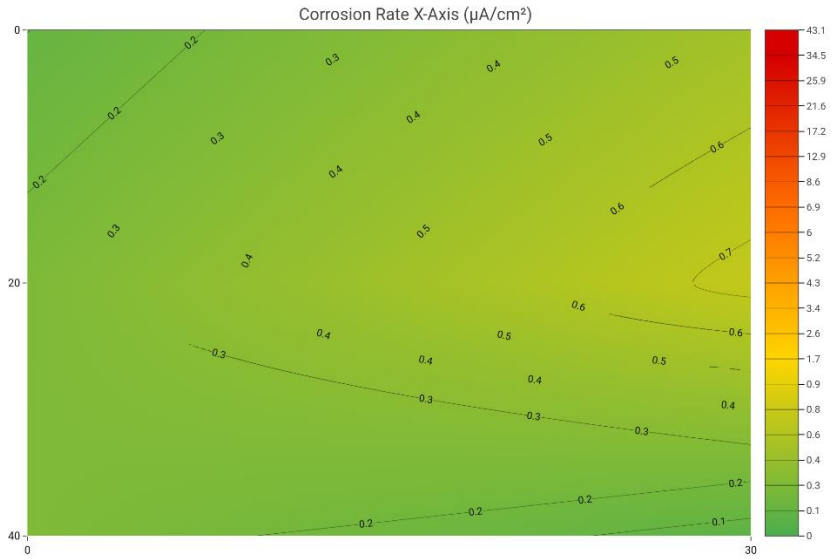
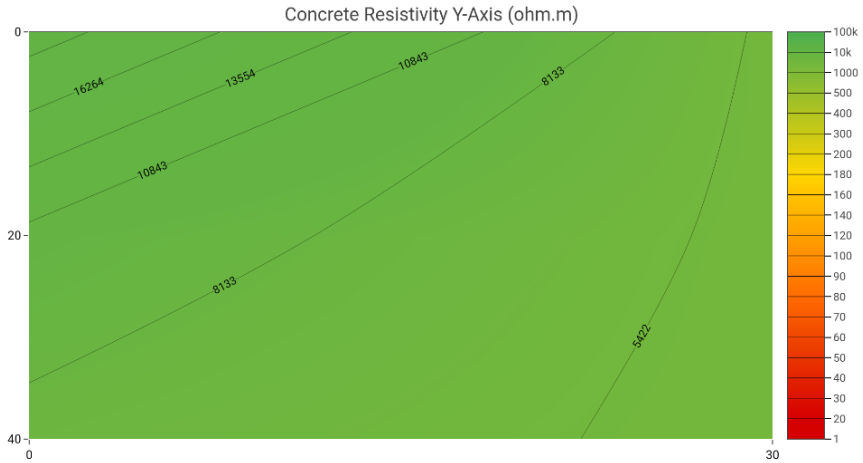


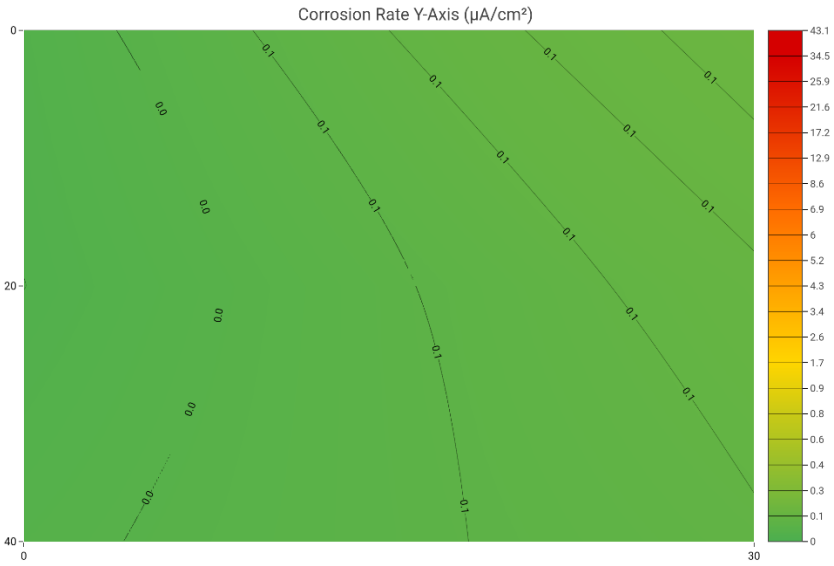
Figura 107 : Griglia PC3_Esterno Sx






Corrosion Rate X-Axis (µA/cm²)
0
20
40
0
30
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0


Concrete Resistivity Y-Axis (ohm.m)
0
20
40
0
30
16264
13554
10843
8133
5422
100k
10k
1000
500
400
300
200
180
160
140
120
100
90
80
70
60
50
40
30
20
1


Corrosion Rate Y-Axis (µA/cm²)
0
20
40
0
30
0.0
0.1
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0

- PC4_Esterno sx

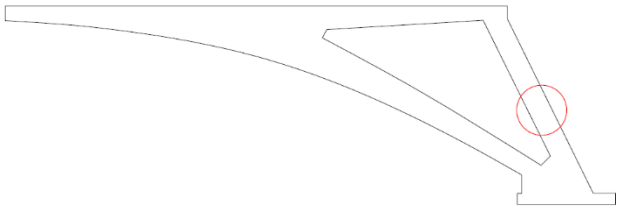
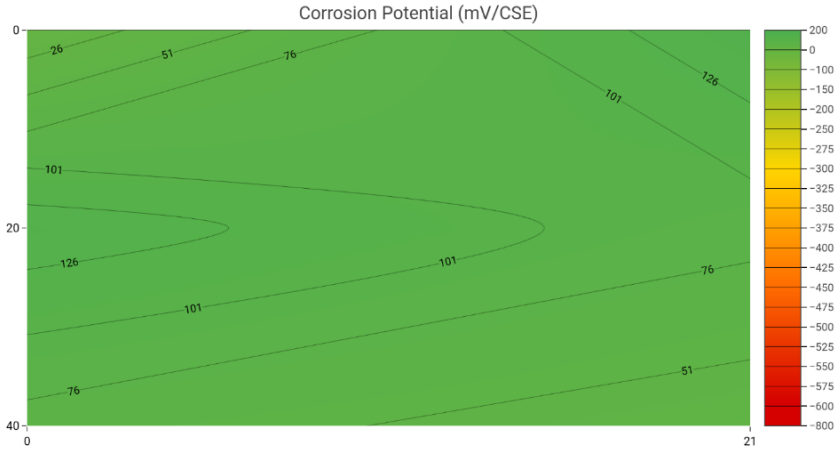
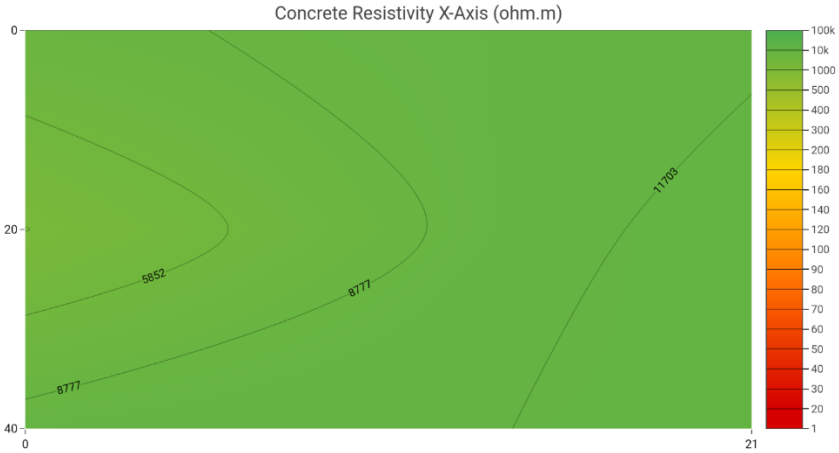
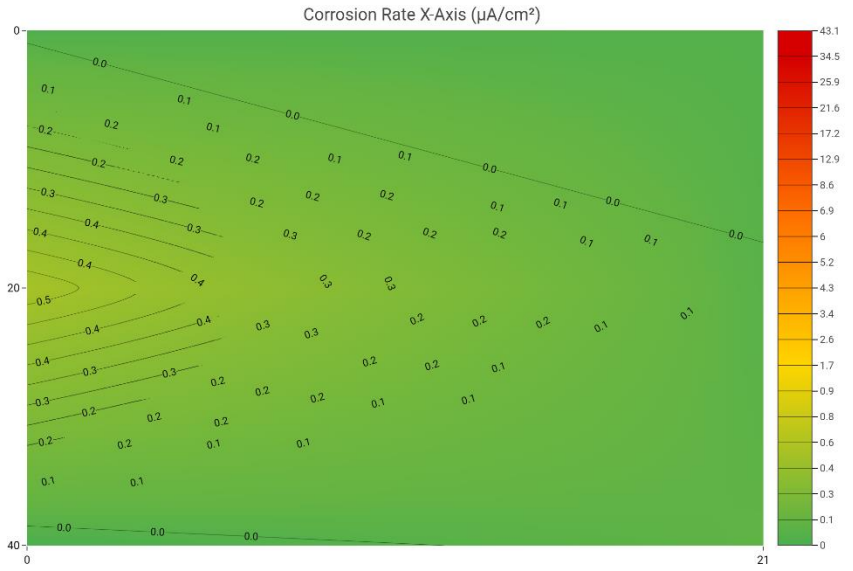
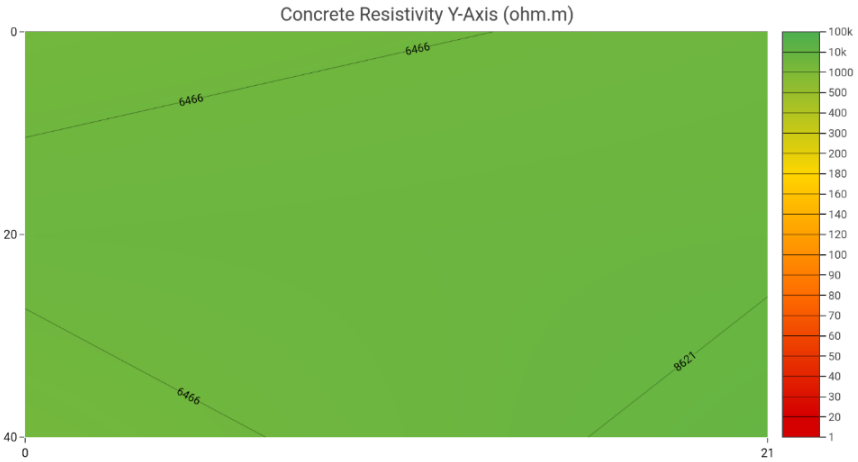


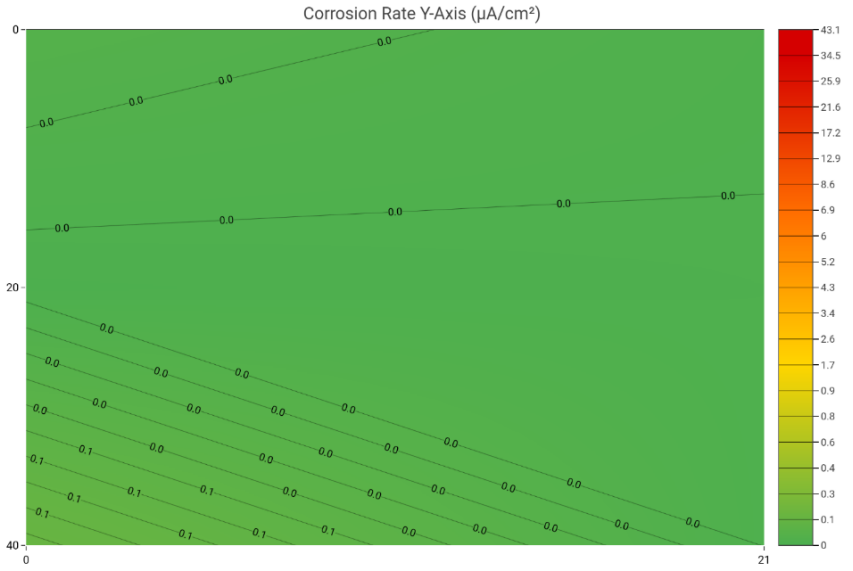
Figura 108 : Griglia PC4_Esterno sx





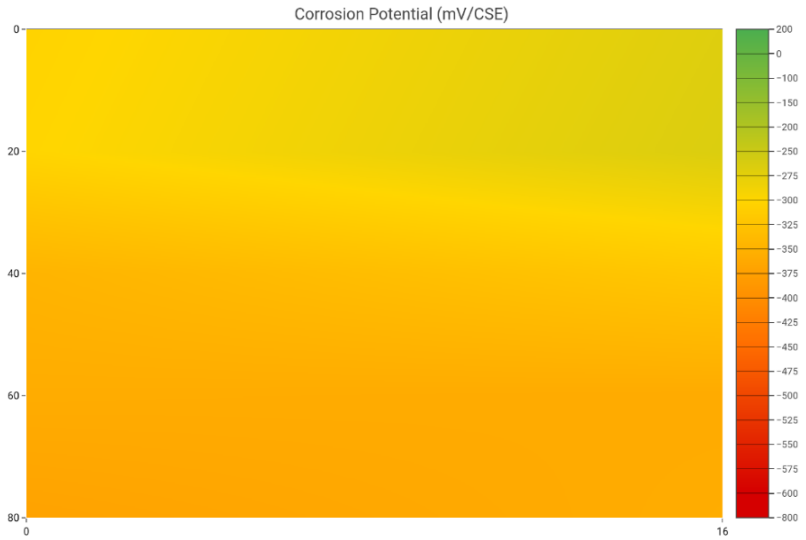

Corrosion Rate X-Axis (µA/cm²)
0
20
40
0
21
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0

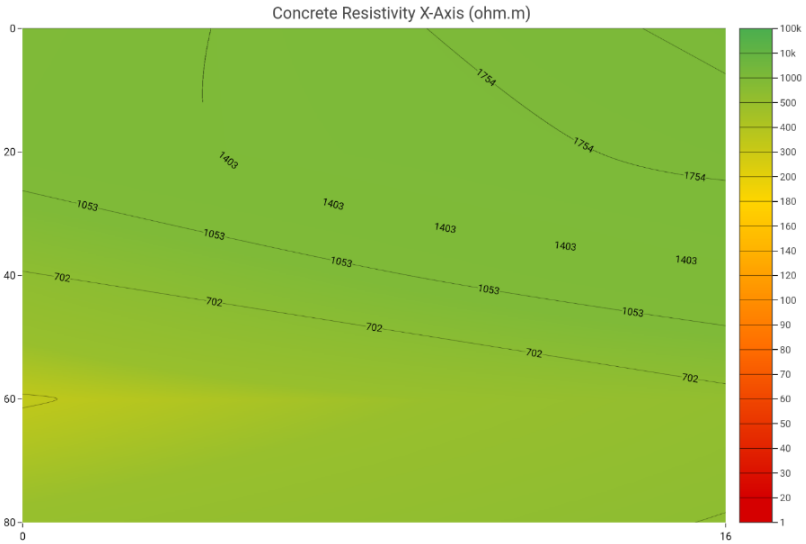

Concrete Resistivity Y-Axis (ohm.m)
0
20
40
0
21
6466
6466
6466
8621
100k
10k
1000
500
400
300
200
180
160
140
120
100
90
80
70
60
50
40
30
20
1

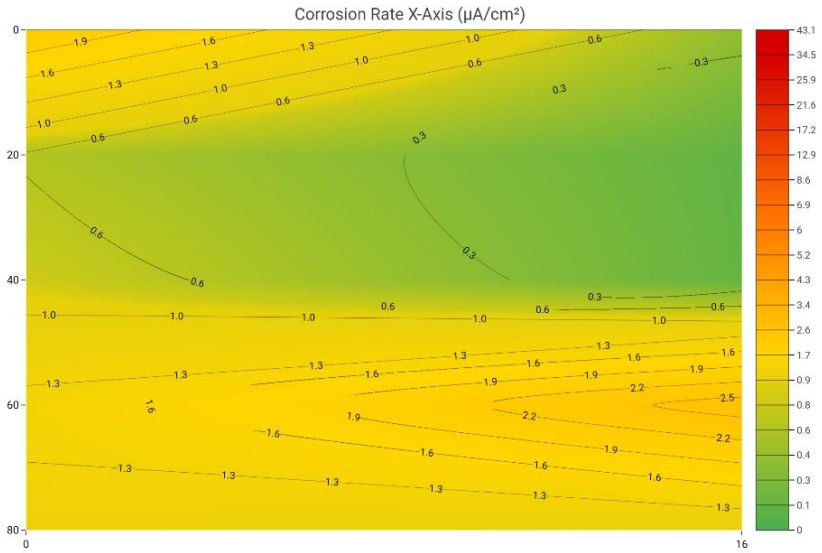

Corrosion Rate Y-Axis (µA/cm²)
0
20
40
0
21
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0

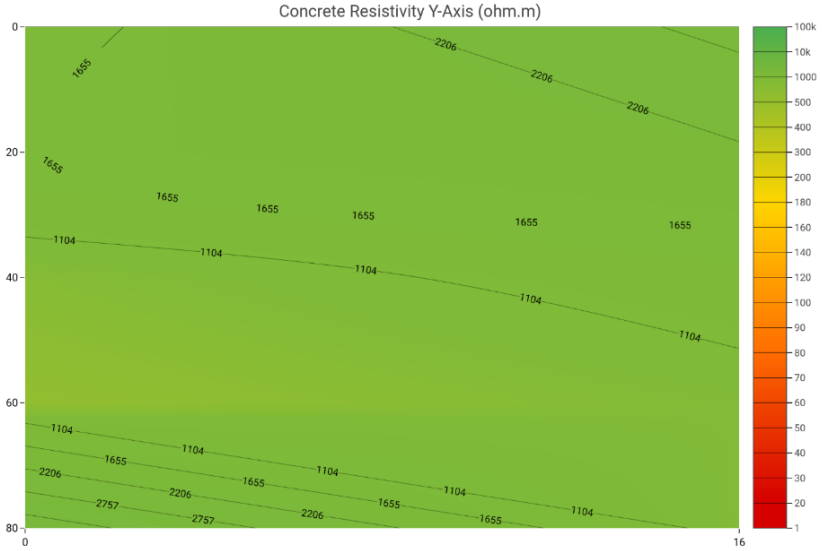
- Pilastro Destro

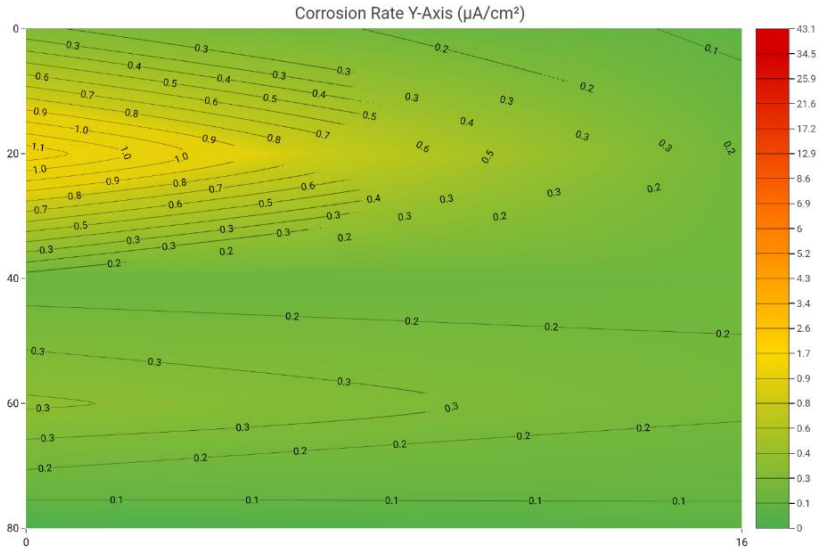
Figura 109 : Griglia Pilastro Dx





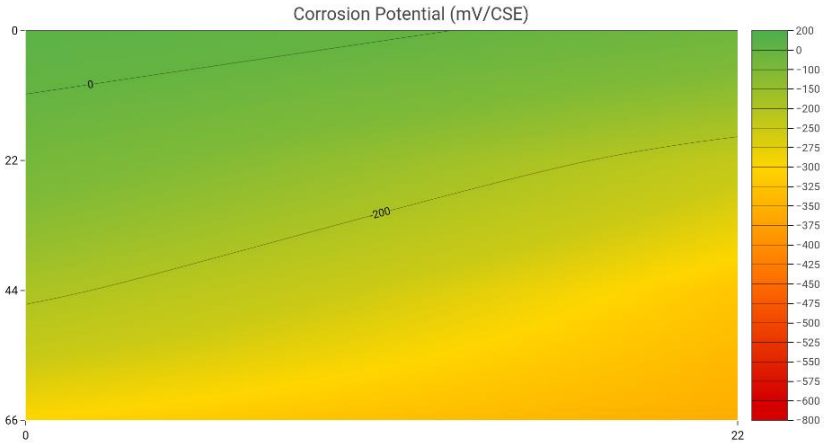

Corrosion Rate X-Axis (µA/cm²)
0
20
40
60
80
0
16
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0

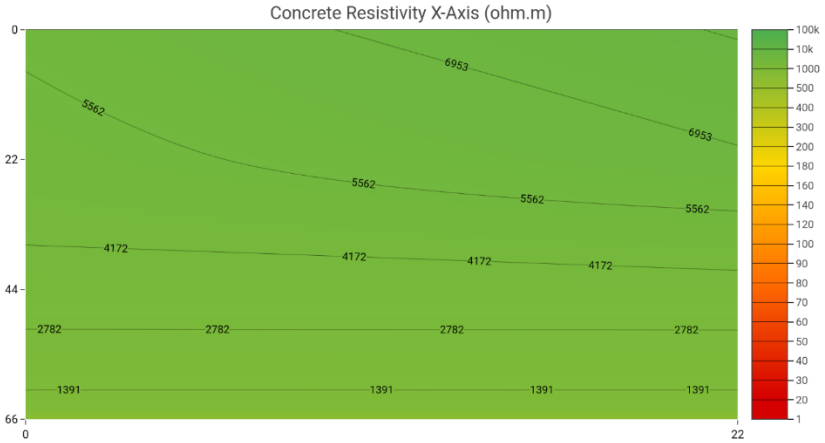

Concrete Resistivity Y-Axis (ohm.m)
0
20
40
60
80
0
16
100k
10k
1000
500
400
300
200
180
160
140
120
100
90
80
70
60
50
40
30
20
1

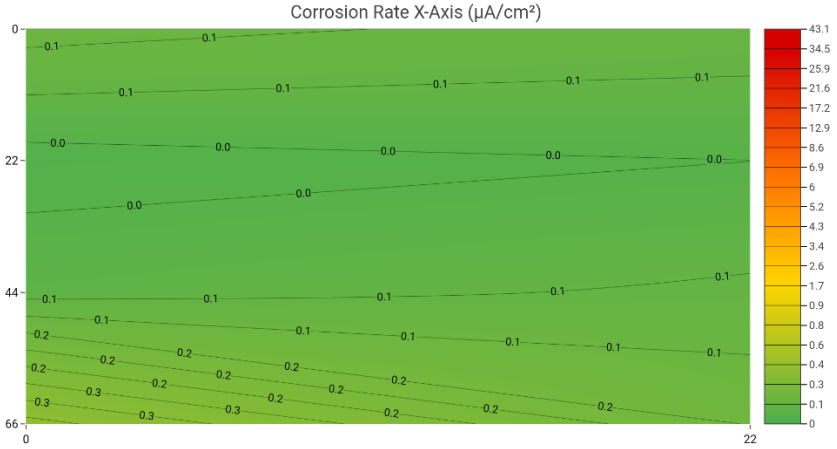

Corrosion Rate Y-Axis (µA/cm²)
0
20
40
60
80
0
16
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0

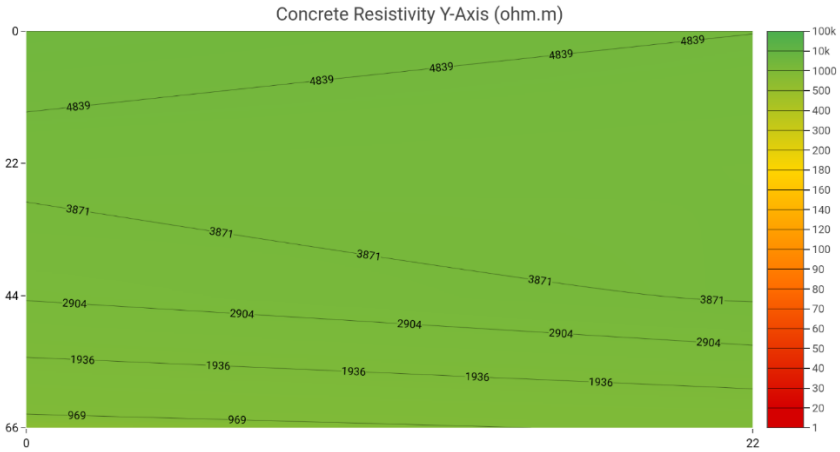
- *Pilastro Sinistro*

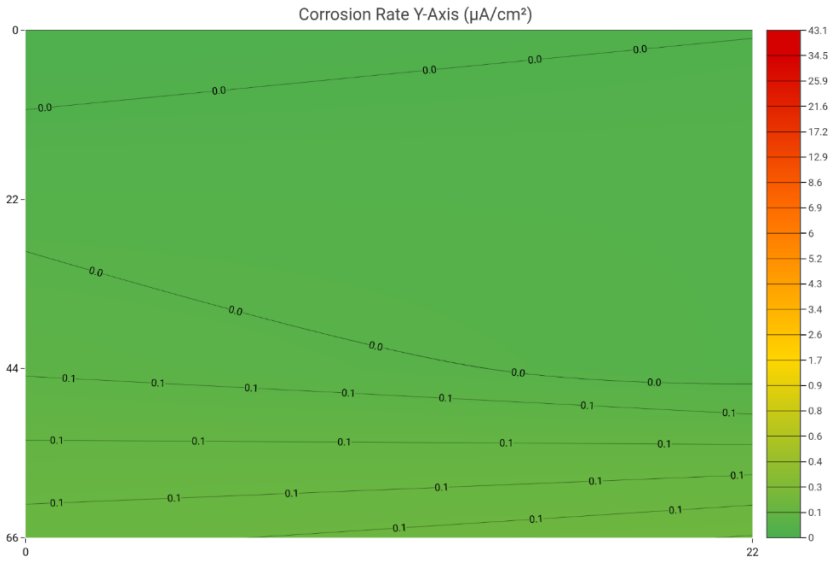
Figura 110 : Griglia Pilastro Sx





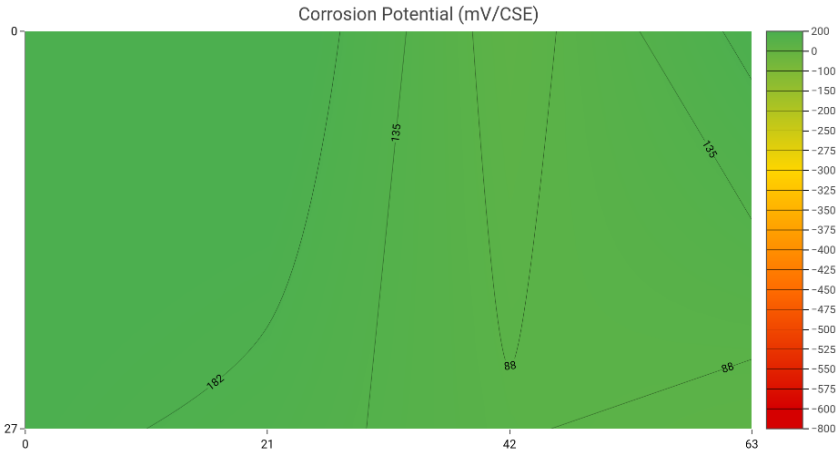

Corrosion Rate X-Axis (µA/cm²)
0
22
44
66
0
22
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0

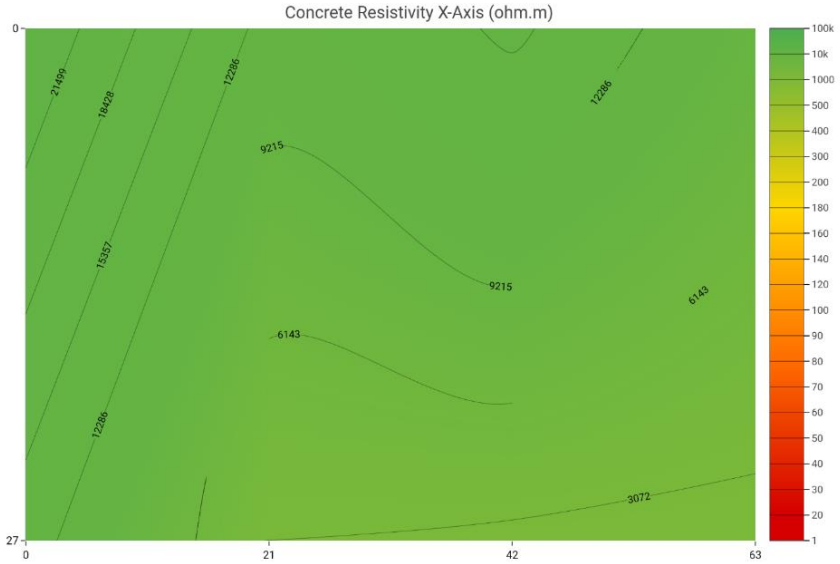

Concrete Resistivity Y-Axis (ohm.m)
0
22
44
66
0
22
100k
10k
1000
500
400
300
200
180
160
140
120
100
90
80
70
60
50
40
30
20
1
4839
3871
2904
1936
969

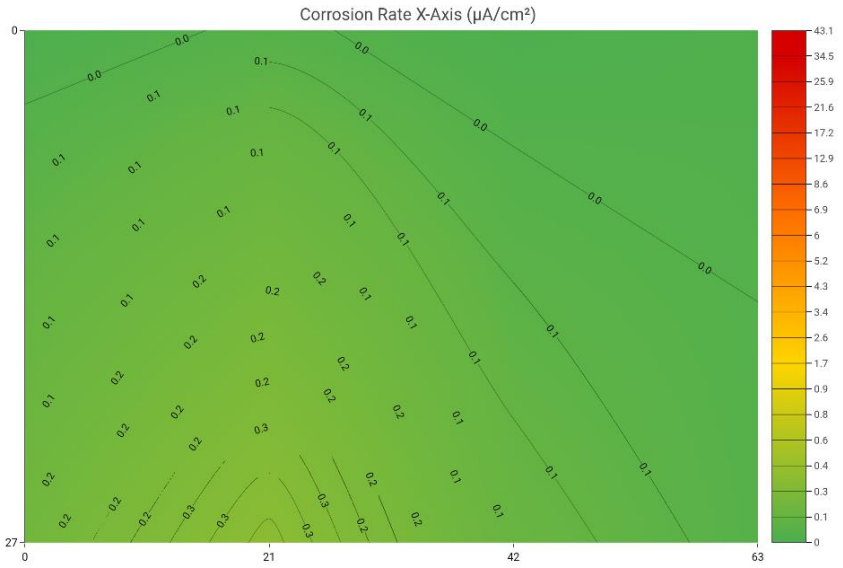

Corrosion Rate Y-Axis (µA/cm²)
0
22
44
66
0
22
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0

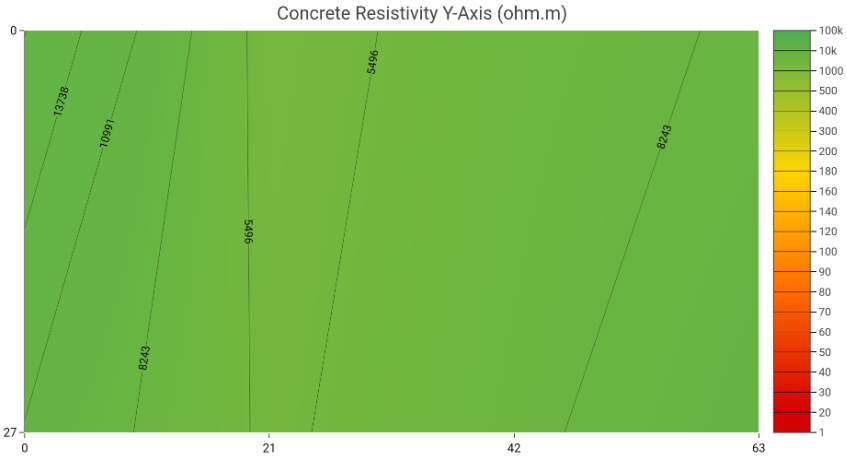
- *Trave Perimetrale*

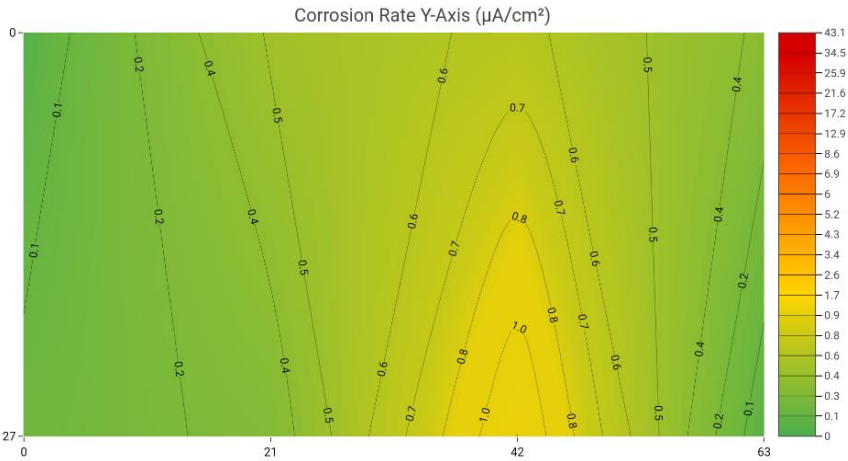
Figura 111 : Griglia Trave perimetrale






Corrosion Rate X-Axis (µA/cm²)
0
27
0
21
42
63
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0


Concrete Resistivity Y-Axis (ohm.m)
0
27
0
21
42
63
13738
10991
8243
5496
5496
8243
100k
10k
1000
500
400
300
200
180
160
140
120
100
90
80
70
60
50
40
30
20
1


Corrosion Rate Y-Axis (µA/cm²)
0
27
0
21
42
63
43.1
34.5
25.9
21.6
17.2
12.9
8.6
6.9
6
5.2
4.3
3.4
2.6
1.7
0.9
0.8
0.6
0.4
0.3
0.1
0

4.4 Osservazioni sui risultati ottenuti

Dall'analisi dei risultati ottenuti è emersa la presenza quasi totale del colore verde. Il colore verde indica, nel caso del potenziale di corrosione, valori prevalentemente positivi, quindi un fenomeno di corrosione non attivo.

Ci sono poi in alcune situazioni delle zone colorate con delle sfumature di giallo in direzione X o in Y, che stanno ad indicare una probabilità maggiore di fenomeni di corrosione attivi e queste sono state riscontrate prevalentemente nelle griglie situate nelle zone più basse o in quelle dove il calcestruzzo era di qualità più scadente.

In definitiva non abbiamo trovato situazioni di corrosione in stato di attività, grazie al fatto che le zone misurate non avevano contatto diretto con l'esterno o fonti di umidità.

Le uniche zone dove è stata riscontrata una colorazione che va su toni più rossi, quindi con una corrosione attiva è nei pilastri dei muri perimetrali. I risultati rispecchiano le considerazioni fatte durante le ispezioni visive in cui si è osservata la presenza di umidità dovuta ad infiltrazioni nel muro che separa l'interno del padiglione con l'esterno.

4.5 Confronto

Si riporta di seguito il confronto dei valori più significativi avuti negli arconi, ossia con le griglie del pilastro PC1 con i valori del pilastro del muro perimetrale, in modo da evidenziare le differenze sullo stato delle armature.

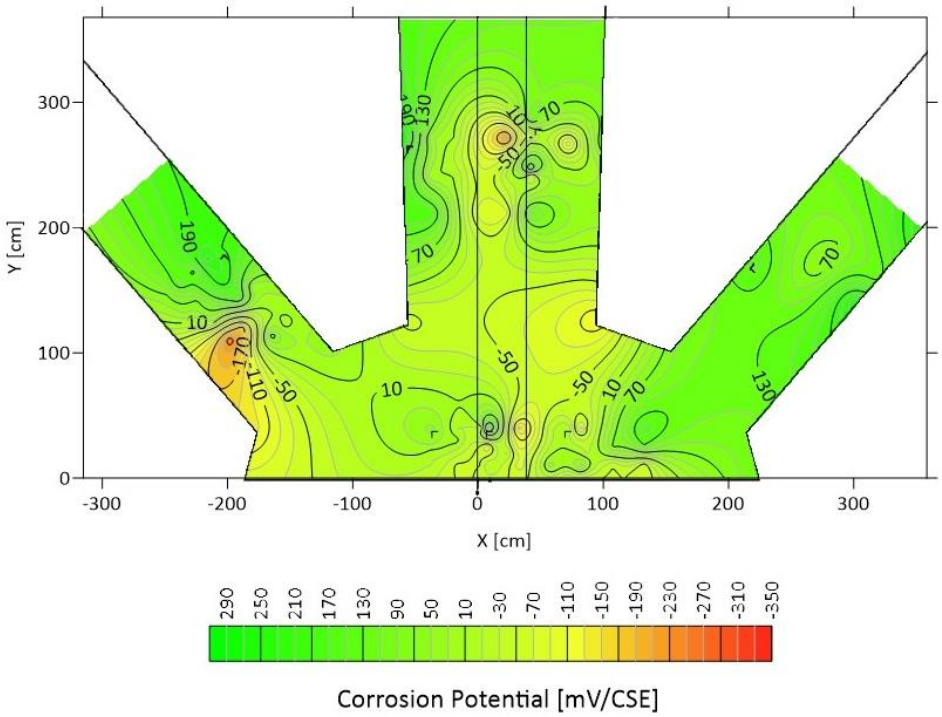


Figura 112 : Mappa del potenziale di corrosione nell'arcone 1

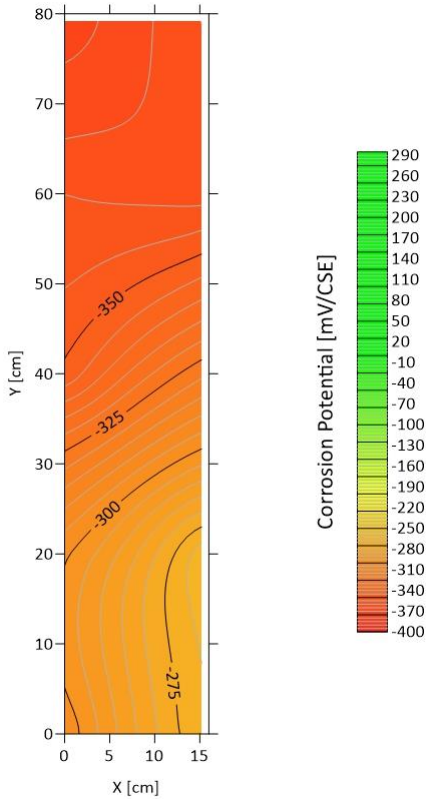


Figura 113 : Mappa del potenziale di corrosione nel pilastro perimetrale

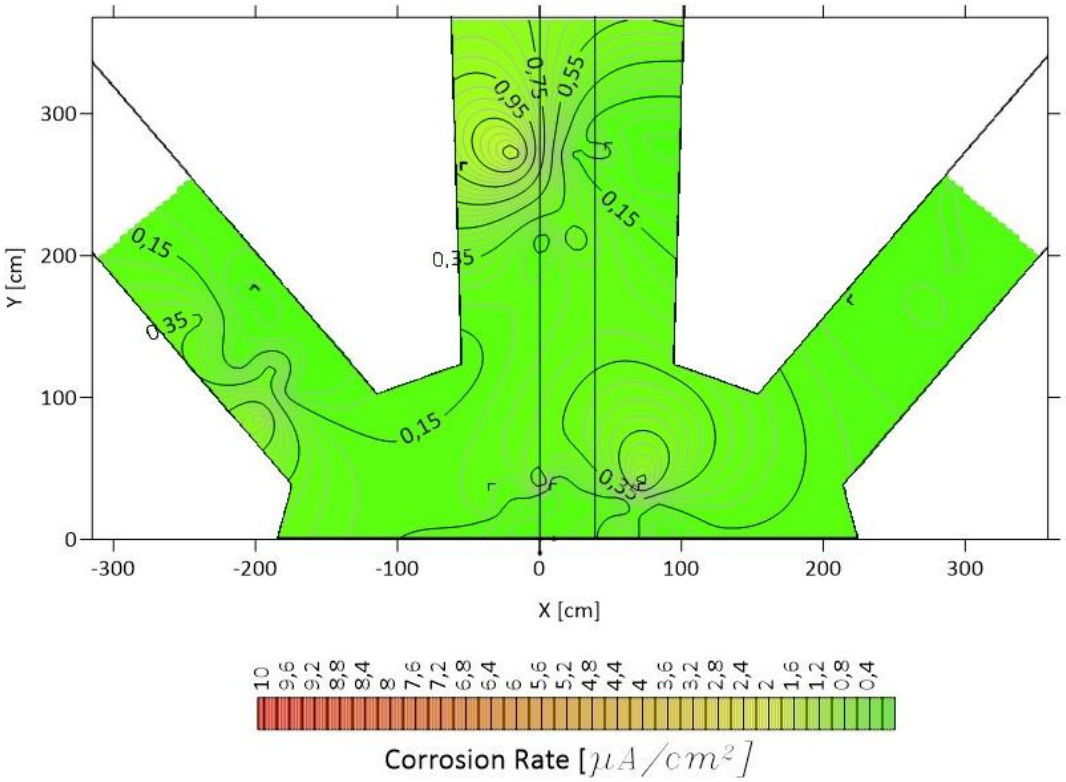


Figura 114 : Mappa della velocità di corrosione

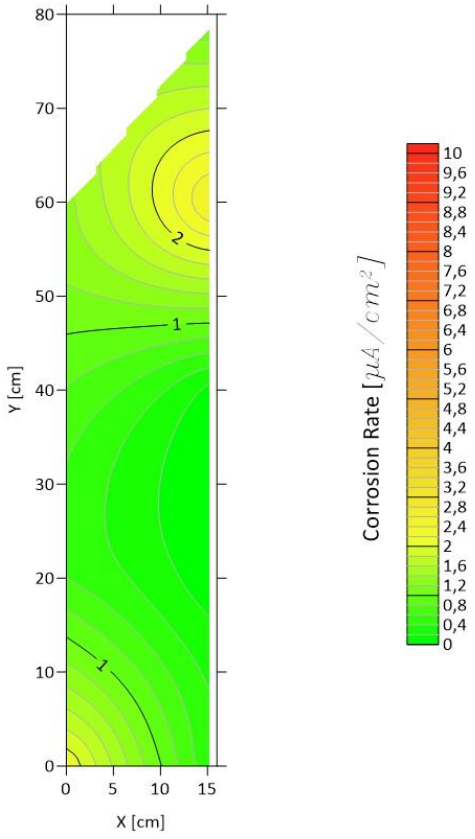


Figura 115 : Mappa della velocità di corrosione

Come si può notare dai valori delle mappe a confronto, l'elemento che risulta in uno stato corrosivo in atto è proprio il pilastro, che presenta valori del potenziale nell'intorno di -350 mV rispetto ai valori principalmente positivi dell'arco, salvo nelle zone con valori che si assestano intorno ai -200 mV.

Le zone dell'arco dove si hanno valori più bassi di potenziale sono proprio le zone più vicine alla fondazione, oltre ad una zona centrale più alta che è situata proprio a ridosso del pilastro centrale, costituito come spiegato in precedenza da una malta più scadente rispetto a quelle che compongono gli elementi ad arco e che nel tempo è stata interessata da fenomeni di risalita capillare, i quali hanno dato inizio a dei fenomeni corrosivi che però nel tempo si sono arrestati.

Il pilastro invece mostra dei valori molto negativi di potenziale proprio nella parte alta, il che sta a indicare come questi fenomeni di corrosione non sono stati indotti da acqua di risalita capillare ma da acqua infiltratasi dall'alto della parete perimetrale in muratura.

5. Prove padiglione B

Nel mese di Luglio 2021 sono iniziati invece i lavori di smantellamento del padiglione dagli ingombri e in parallelo sono iniziate le indagini della stessa tipologia di quelle fatte nel padiglione C.

In questo capitolo si evidenziano le prove sulla corrosione effettuate su 3 dei 14 pilastri che sorreggono la copertura e il ballatoio.

Anche in questo caso ci sono state delle fasi preliminari utilizzando uno scalpello elettrico per la rimozione dell'intonaco e per la rimozione del copriferro per le misure di potenziale. In seguito, è stata effettuata la pacometria per disegnare la griglia per le misure di potenziale, velocità di corrosione e resistività.

Figura 116 : Stato attuale del padiglione B

Di seguito vengono riportati i grafici ottenuti dalle misure effettuate sui tre pilastroni. Per le misure di potenziale sono state realizzati più punti di misurazione grazie alla facilità di utilizzo del voltmetro in grado di effettuare le misure istantaneamente e senza necessariamente rimuovere grandi aree di intonaco.

Per le misure di potenziale di corrosione è necessario l'aggancio dello strumento ad una barra di armatura come si mostra nella figura sottostante.

Figura 117 : Morsetto collegato alla barra di armatura scoperta

5.1 Pilastro P4

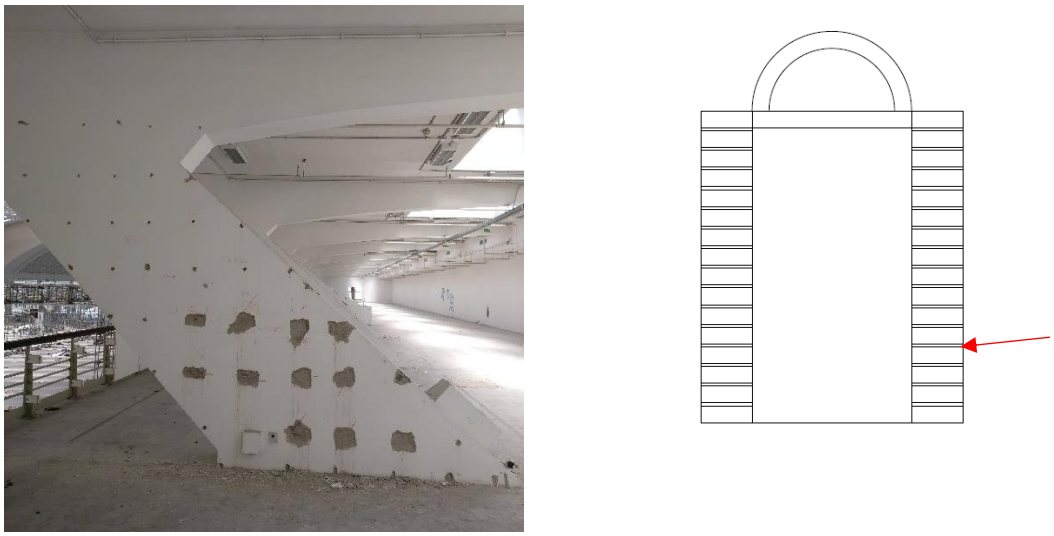
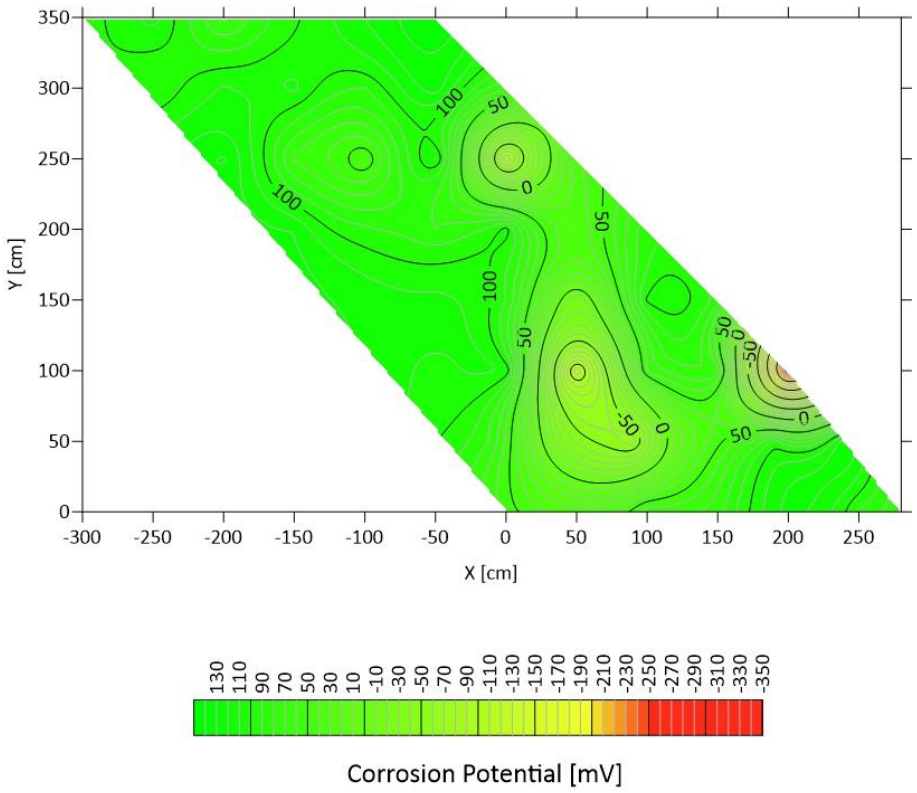
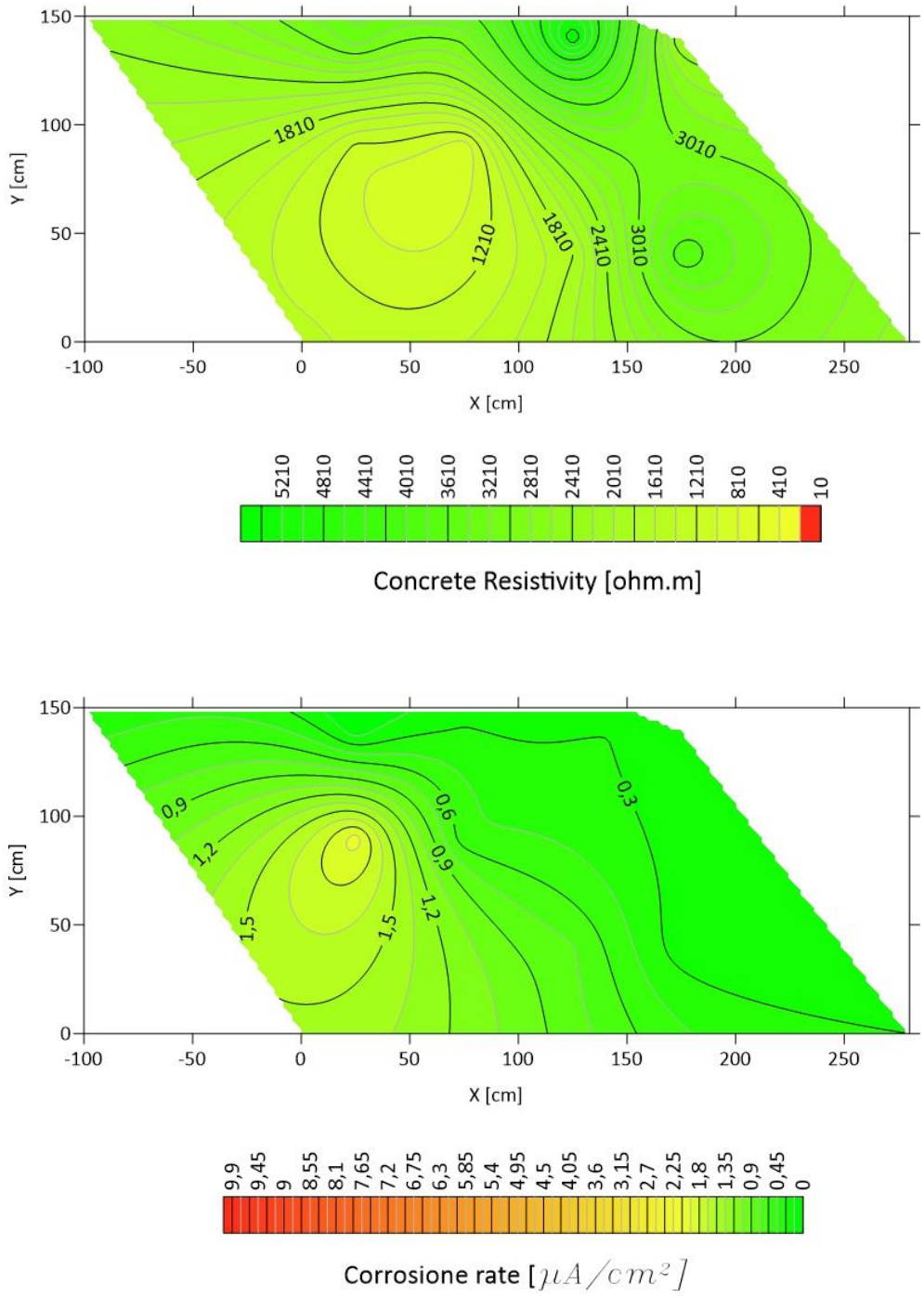


Figura 118 : Griglia e posizione del pilastro P4

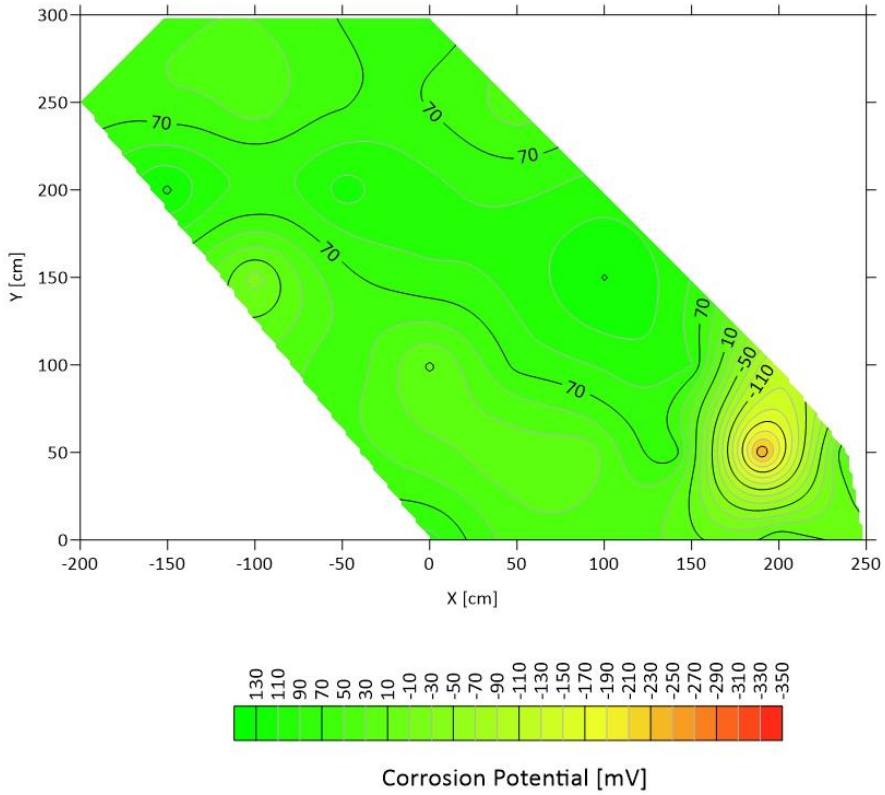


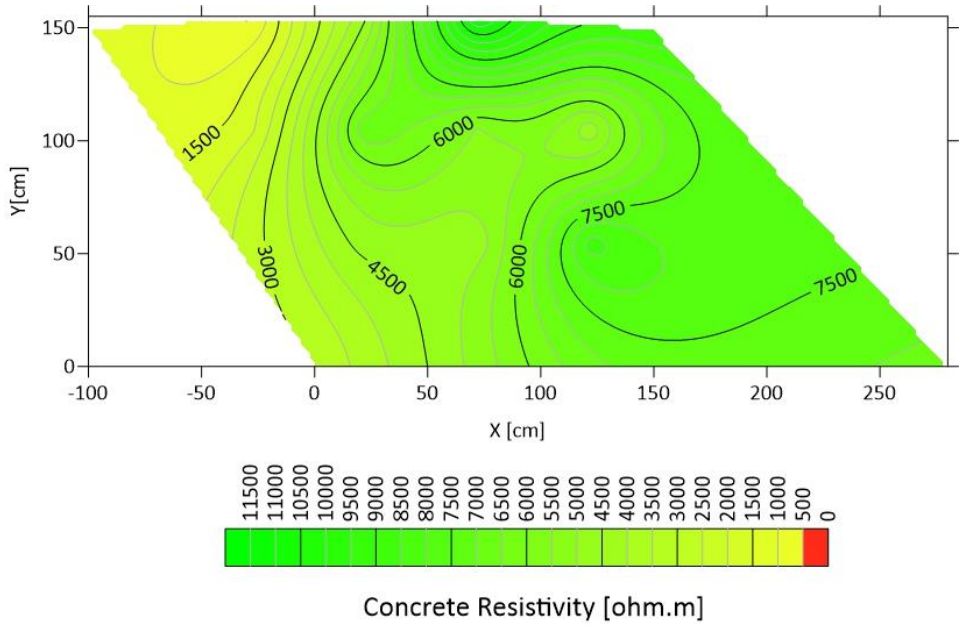


Le mappe della velocità di corrosione e della resistività del calcestruzzo sono state realizzate utilizzando l'ICOR su una griglia più piccola rispetto alla numerosità di punti ottenuti con il potenziale di corrosione.

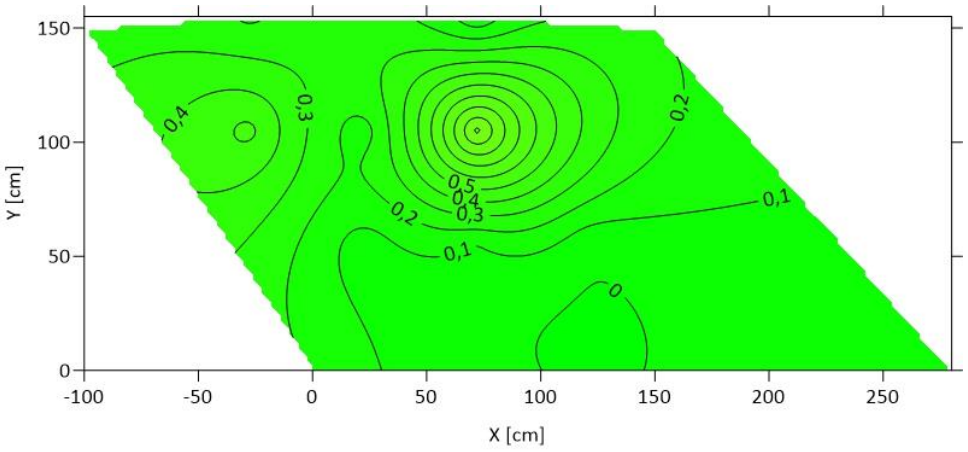
5.2 Pilastro P7

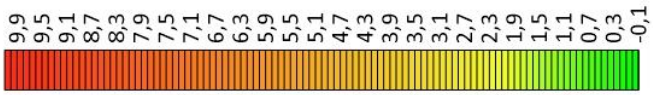
Figura 119 : Griglia e posizione del pilastro P7





Concrete Resistivity [ohm.m]

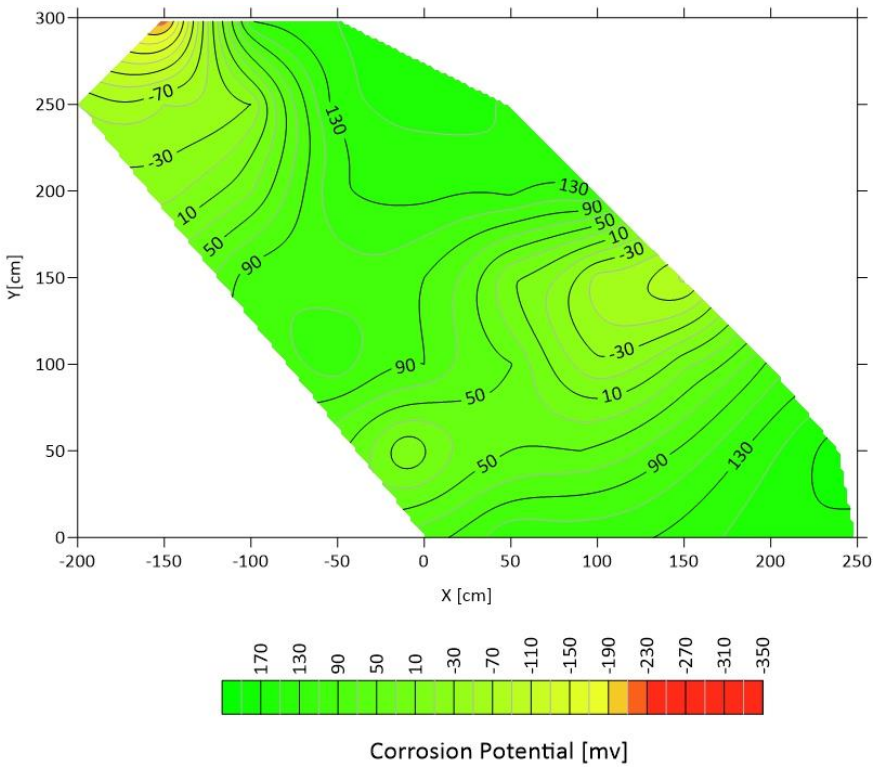


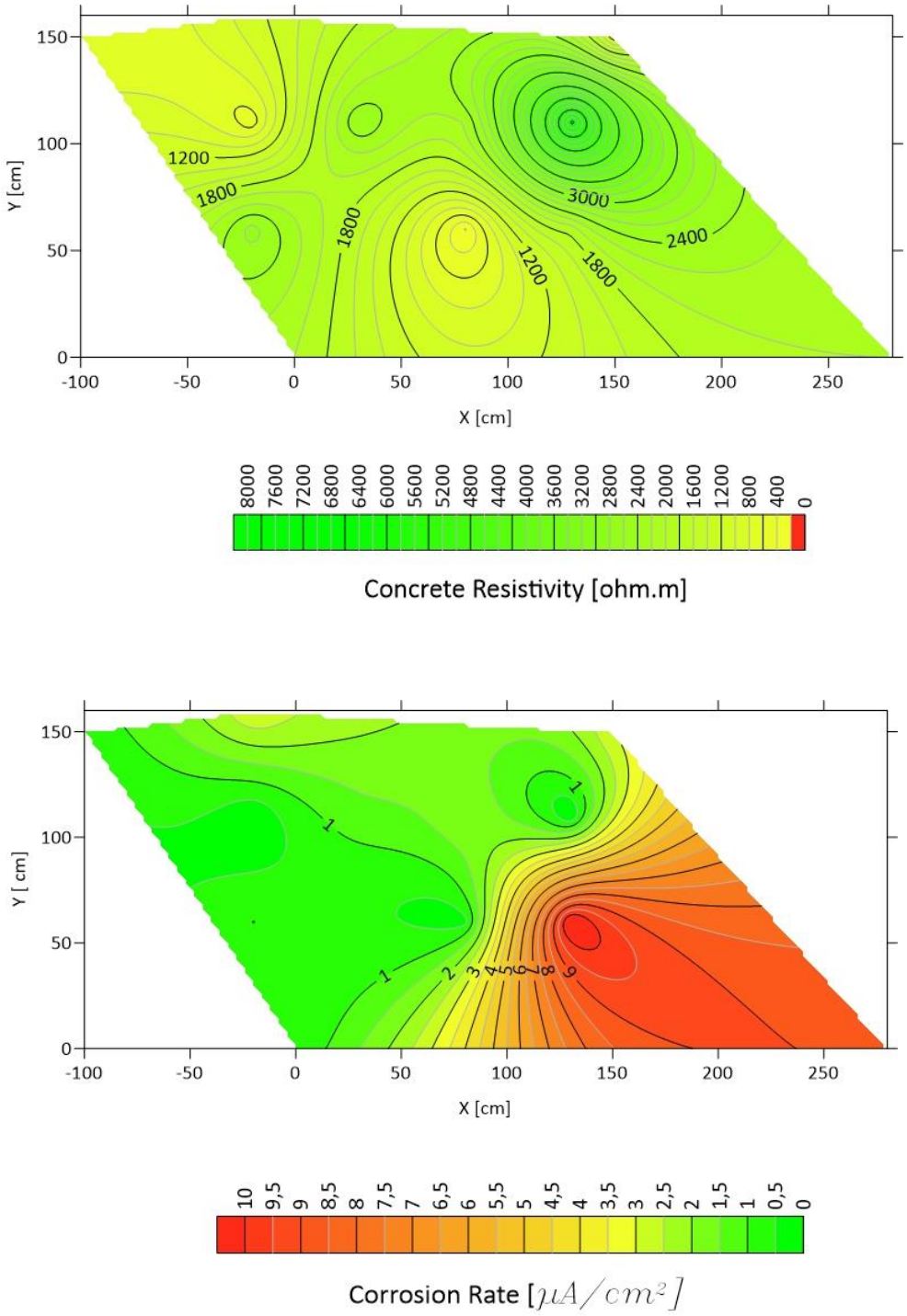


Corrosion Rate [$\mu A/cm^2$]

5.3 Pilastro P13

Figura 120 : Griglia e posizione del pilastro P13




150
100
50
0
Y [cm]
-100
-50
0
50
100
150
200
250
X [cm]
1200
1800
1800
3000
2400
1200
1800
8000
7600
7200
6800
6400
6000
5600
5200
4800
4400
4000
3600
3200
2800
2400
2000
1600
1200
800
400
0
Concrete Resistivity [ohm.m]

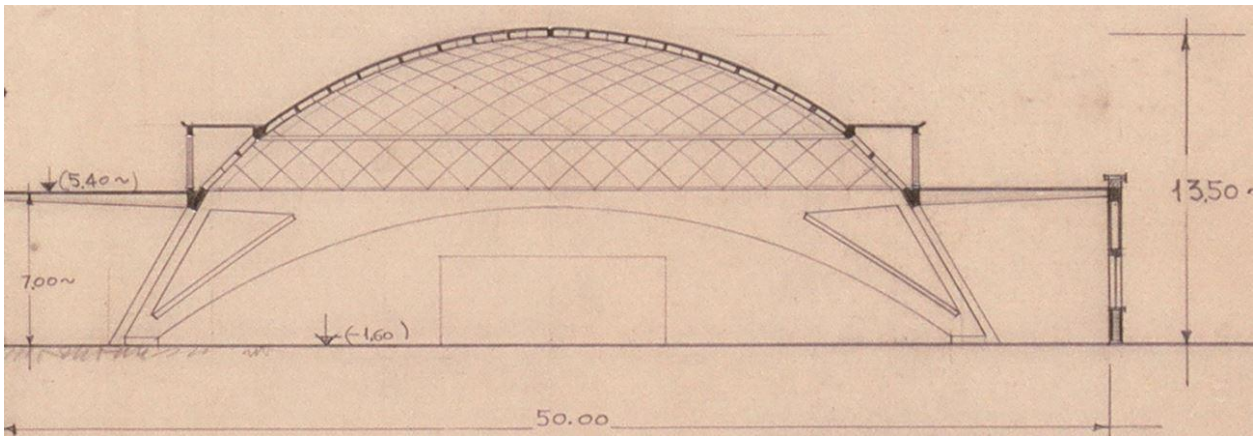
150
100
50
0
Y [cm]
-100
-50
0
50
100
150
200
250
X [cm]
1
1
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
9,5
9
8,5
8
7,5
7
6,5
6
5,5
5
4,5
4
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
Corrosion Rate [$\mu A/cm^2$]

I valori rappresentati nelle mappe indicano una bassa probabilità di corrosione attiva in tutti e tre i pilastri analizzati. Si possono notare dei valori anomali, ad esempio, nella mappa del potenziale di corrosione del pilastro P7 e nella parte alta del pilastro P13, dovuti alla vicinanza di chiodi in ferro che hanno disturbato lo strumento.

La mappa che presenta valori nel range di alta probabilità di corrosione è la zona bassa del pilastro P13, dove nella mappa della velocità di corrosione sono presenti valori vicino al 10, che però sovrapposti alle mappe di potenziale di corrosione e resistività del calcestruzzo risultano meno gravi di quanto rappresentato dalla mappa. Infatti, come rappresentato nella mappa del potenziale nella zona interessata ci sono valori del potenziale superiore ai 100 mV, che corrispondono ad una probabilità di corrosione inferiore al 10%.

6. Scelta del Mockup

6.1 Trave ondulata del solaio perimetrale



L'elemento scelto per essere realizzato in laboratorio, in scala 1:1, è una delle travi ondulate che sorreggono il solaio perimetrale del padiglione C. Il solaio ondulato rappresenta un elemento fondamentale per il salone C. È costituito da elementi in ferrocemento di circa 9.5 m di luce e poi completati da un getto in opera.

Una sua funzione statica, in particolare nelle zone d'angolo sarebbe quella di apportare una correzione alla spinta orizzontale della volta nelle zone di collegamento con gli arconi. Si è deciso di realizzare un provino di 0.94 m di larghezza e 6 m di lunghezza, compreso un diaframma a metà lunghezza, in modo da riprodurre i 2/3 della lunghezza complessiva. Ancora in discussione la metodologia per condizionare il provino localmente, in modo da avere sezioni integre e sezioni ammalorate artificialmente.

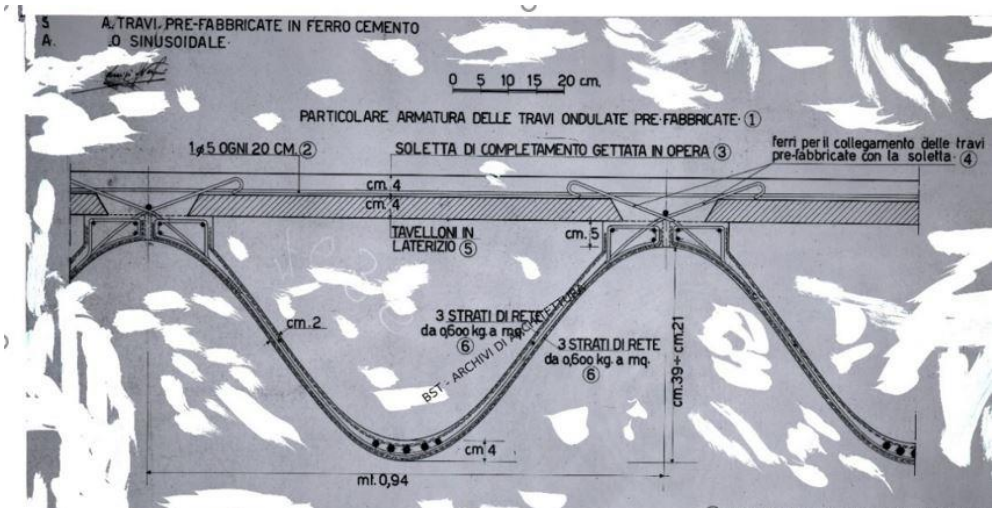


Figura 121 : Sezione generica di trave ondulata con soletta di completamento

La sezione della trave ondulata non è costante ma varia, crescendo dall'esterno all'interno verso gli arconi, dove raggiunge la sua massima altezza.

È un elemento modulare e monolitico che accostato ad elementi della medesima natura, presenta grandi caratteristiche resistenti.

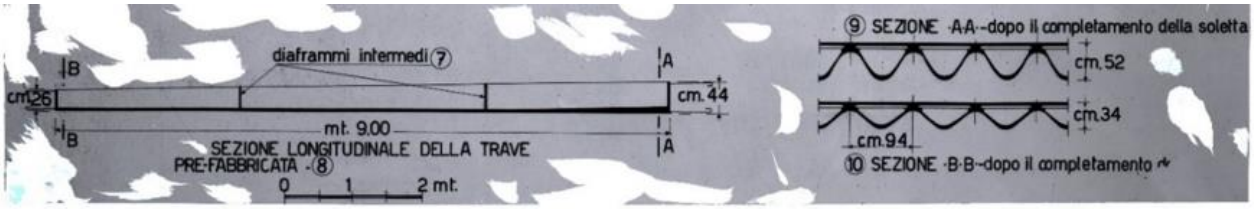


Figura 122 : Sezione longitudinale che mostra la variazione di sezione

La variazione di sezione è inoltre riportata in un disegno in scala 1:1 ritrovato negli archivi, riportato in Figura 209.

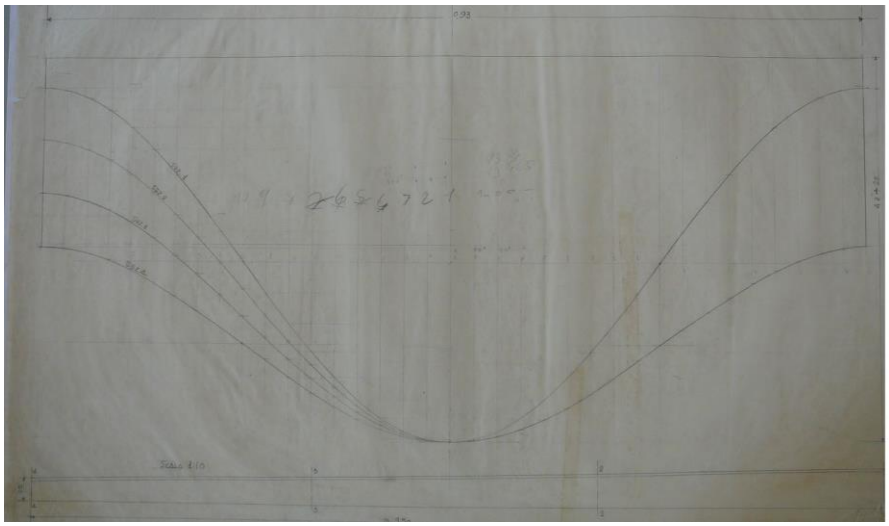


Figura 123 : Variazione di sezione trave ondulata

La trave ondulata del Salone C, come riportato nella Figura 207, presenta complessivamente 6 strati di rete metallica da 0,600 kg/m^2 formando la caratteristica curva, pressoché analoga a quella del concio della volta ondulata del salone B. Dalla Figura 210 si nota invece un differente numero di strati di rete, in questo caso risulta essere pari a 3. [9]

Le armature longitudinali variano a seconda dell'elemento che si analizza, perché ci sono dei casi particolari quando le travi si accorciano e vanno a rastremarsi lungo la trave d'angolo. Per la trave denominata nella tavola della Figura 212 "normale" nella zona dell'incavo di 4 cm sono presenti 5 barre di armatura longitudinali, tre di diametro 10 mm e due di 12 mm come si vede dalla Figura 210. [12]

Nella figura, inoltre, si nota la presenza di altre barre longitudinali, di diametro 5 mm, dello stesso diametro delle barre piegate trasversalmente, utili a creare una gabbia insieme alle reti metalliche dove poi spalmare la malta cementizia.

Le barre da 5 mm vengono utilizzate anche per costruire i diaframmi, sagomati opportunamente come nel disegno, composto da 7 barre orizzontali e 4 verticali, formando un reticolo di 10 cm di apertura. [12]

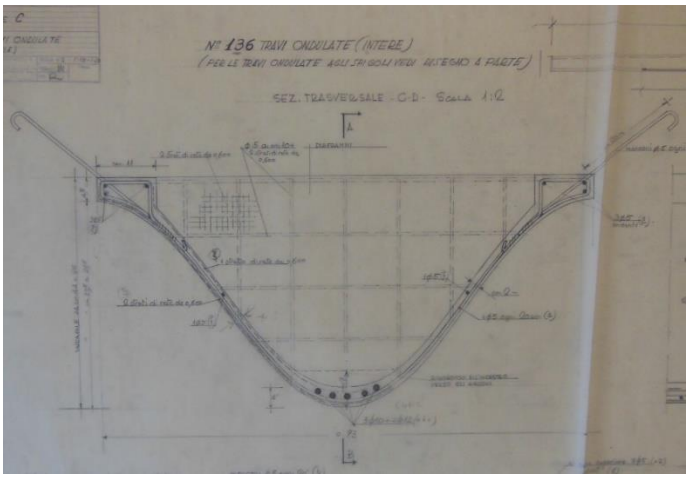


Figura 124 : Sezione trave ondulata

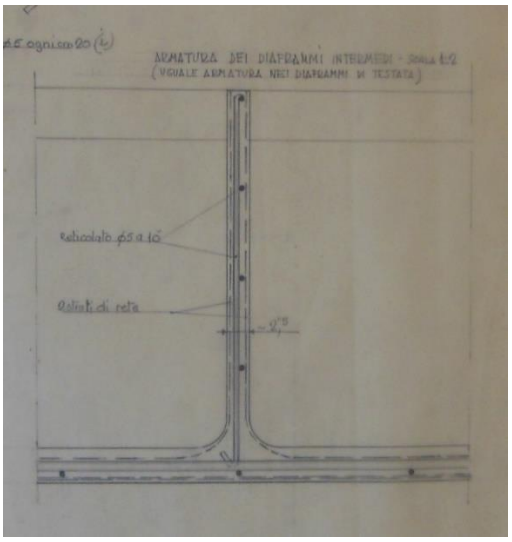
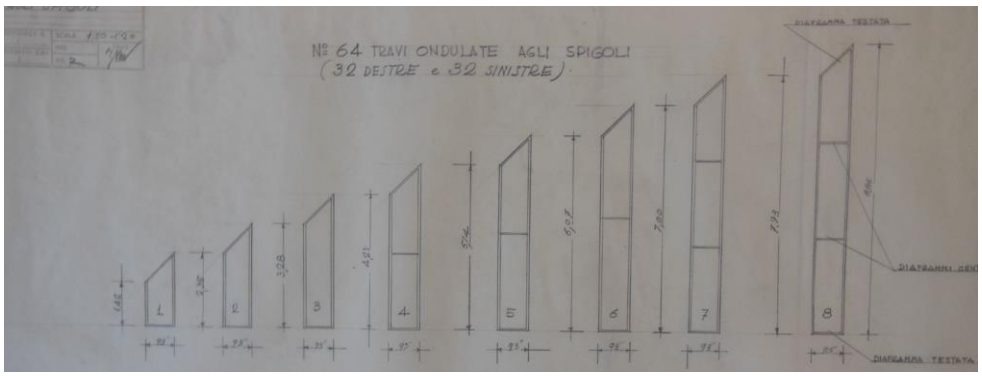


Figura 125 : Vista laterale del diaframma



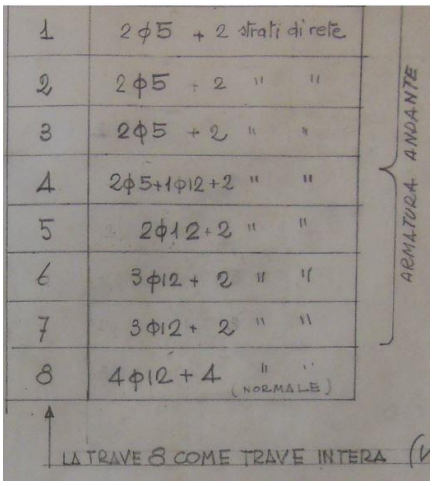


Figura 126 : Armatura longitudinale inferiore per diversi tipi di travi ondulate

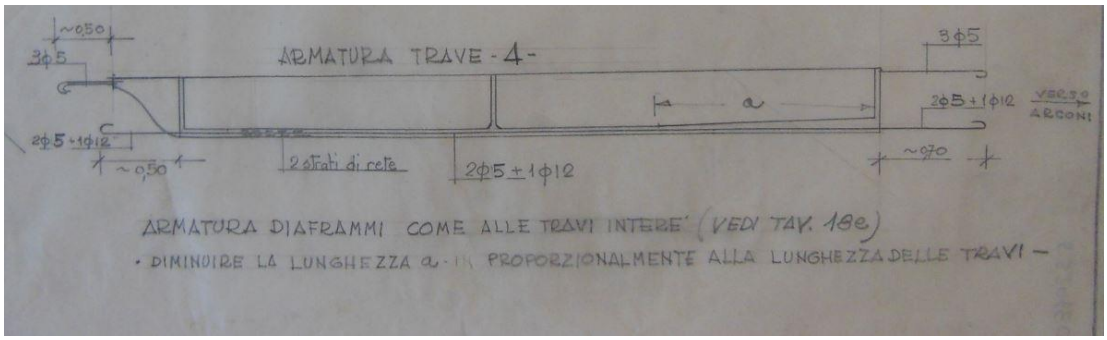


Figura 127 : Esempio di una sezione longitudinale di una trave ondulata armata

Passando all'armatura del solaio invece abbiamo un reticolo inclinato di 45° di ϕ5 con passo 20 cm, come da disegno:

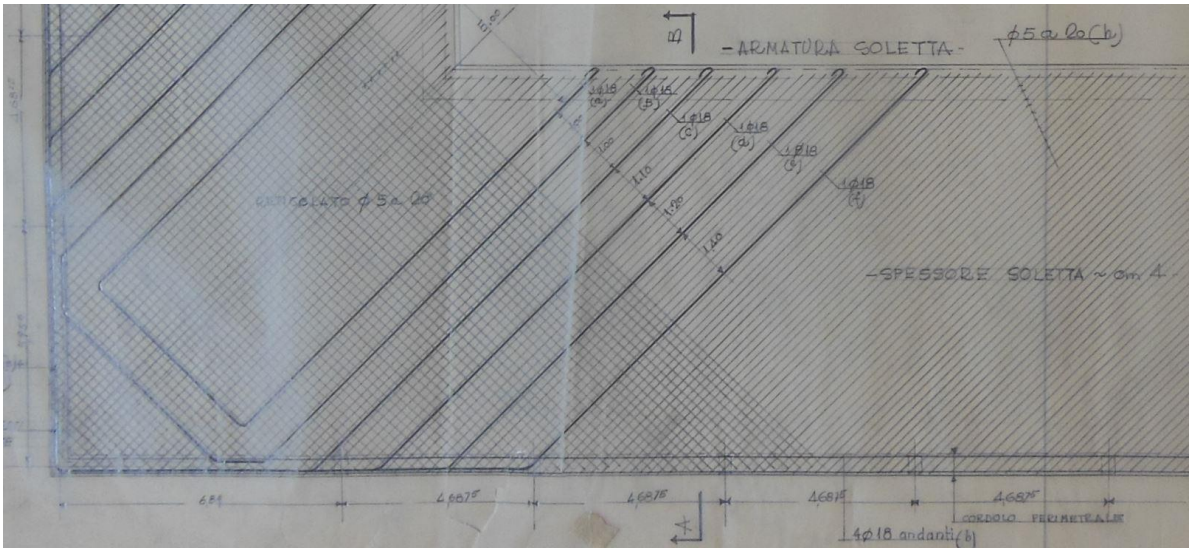


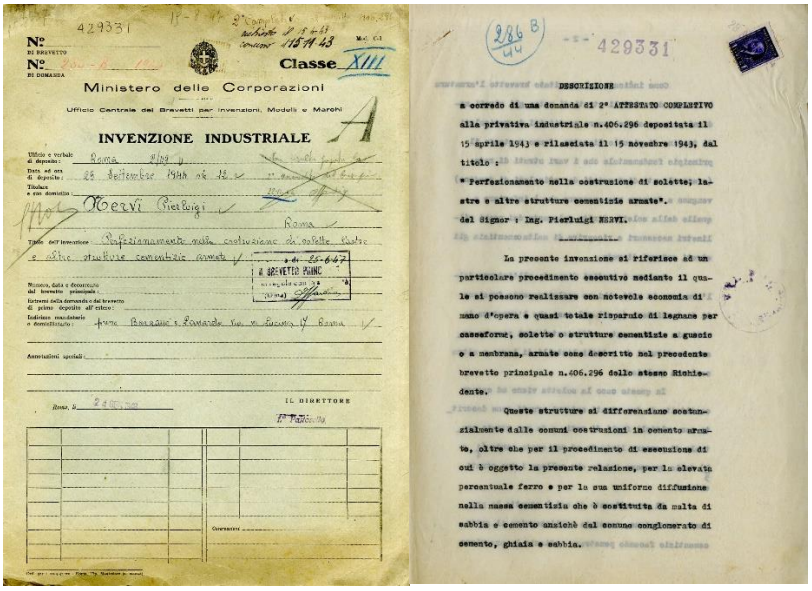
Figura 128 : Armatura solaio perimetrale

Nella soletta si dispone un'armatura di ripartizione formata da un reticolato (a 45°) di Ø 5/20" la quale assicura la resistenza al taglio per il funzionamento del solaio come taleio anulare orizzontale.

Figura 129 : Spiegazione dell'armatura nel solaio tratta dalla relazione di calcolo originali

6.2 Realizzazione pratica

La procedura realizzativa è descritta nel brevetto depositato da Nervi nel 1944.



Nº 429331
Classe XIII
Ministero delle Corporazioni
Ufficio Centrale dei Brevetti per Invenzioni, Modelli e Marchi
INVENZIONE INDUSTRIALE
Nervi Pierluigi
Roma
Perfezionamento nella costruzione di solette, lastre e altre strutture cementizie armate
BREVETTO PIANC
IL DIRETTORE

429331
DESCRIZIONE
a corredo di una domanda di 2° ATTESTATO COMPLEMENTIVO alla privativa industriale n.406.296 depositata il 15 aprile 1943 e rilasciata il 15 novembre 1943, dal titolo:
"Perfezionamento nella costruzione di solette, lastre e altre strutture cementizie armate".
del Signor Ing. Pierluigi NERVI.
La presente invenzione si riferisce ad un particolare procedimento esecutivo mediante il quale si possono realizzare con notevole economia di mano d'opera e quasi totale risparmio di legname per casseforme, solette o strutture cementizie a guscio o a membrana, armate come descritto nel precedente brevetto principale n.406.296 dello stesso Richiedente.
Queste strutture si differenziano sostanzialmente dalle comuni costruzioni in cemento armato, oltre che per il procedimento di esecuzione di cui è oggetto la presente relazione, per la elevata percentuale ferro e per la sua uniforme diffusione nella massa cementizia che è costituita da malta di sabbia e cemento anzichè dal comune conglomerato di cemento, ghiaia e sabbia.

Figura 130 : Estratto brevetto originale del ferrocemento depositato dall'Ing. Pierluigi Nervi

L'elemento negli anni '50 è stato realizzato utilizzando degli stampi fatti con calcestruzzo aventi la forma ondulata come da progetto, successivamente venivano formati gli strati di rete, sovrapponendoli e dandogli la giusta forma spingendoli verso lo stampo rigido. Successivamente veniva colata la malta cementizia e fatta aderire a mano agli strati di rete precedentemente posati. Il tutto sorretto da un cassero in legno come si evidenzia dalle Figura 131.

Figura 131 : Prefabbricazione elemento ondulato

Figura 132 : Stoccaggio elemento finito

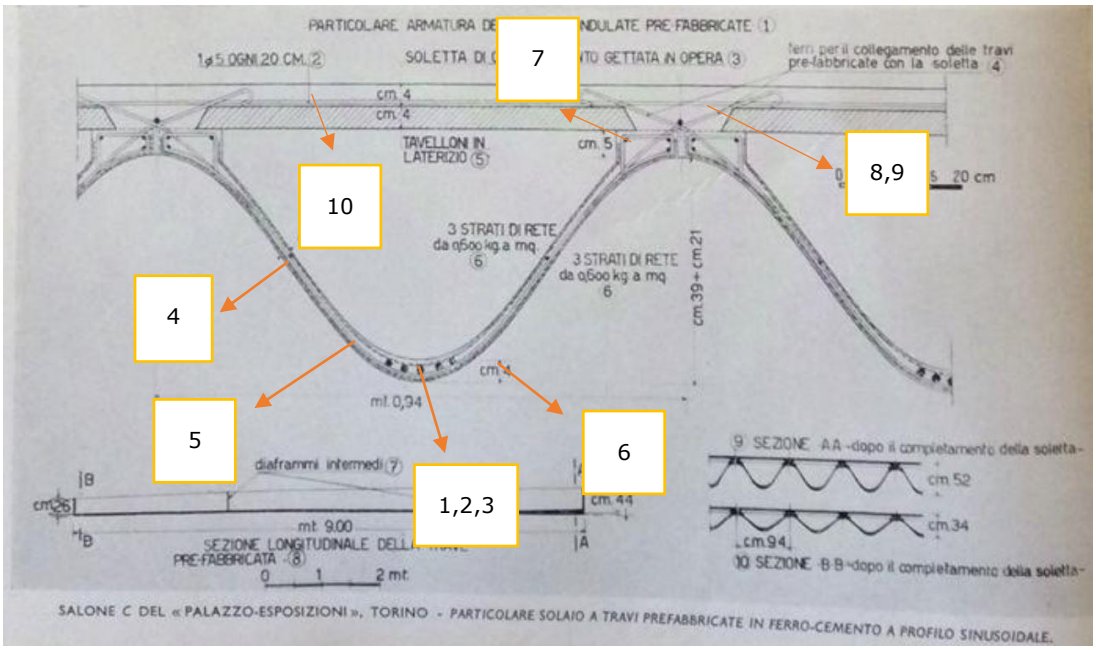


Figura 133 : Step Realizzativi mockup

Gli step pensati per la realizzazione del Mockup sono i seguenti:

1. Realizzazione di un cassero con geometria come da rilievo e disegno;
2. Posa dei due strati di rete in modo tale che aderiscano perfettamente al cassero;
3. Posizionamento dei tre diaframmi, due esterni e uno in mezzeria;
4. Getto di malta, facendola passare bene attraverso le maglie, questo processo va effettuato lungo tutta la lunghezza del provino;
5. Posizionamento le barre di armatura longitudinale secondo il disegno;
6. Getto per coprire le armature appena disposte nella zona d'incavo;
7. Una volta che il getto avrà fatto presa, quanto realizzato sarà utilizzato come cassero per posizionare i rimanenti 2 strati di rete, che verrebbero nuovamente inclusi in un nuovo getto di malta cementizia a formare un pacchetto con spessore circa 3 cm; in particolare nella zona sommitale verrà predisposta con i 2 strati di rete una sponda per il contenimento del getto di completamento una volta posizionata l'armatura del solaio;

8. Getto di completamento nella parte sommitale;
9. Ancoraggio delle armature studiando un apposito piego per simulare l'ancoraggio al solaio appartenente alla trave adiacente.
10. Posizionamento dei tavelloni in legno, delle armature e infine getto del solaio in calcestruzzo.

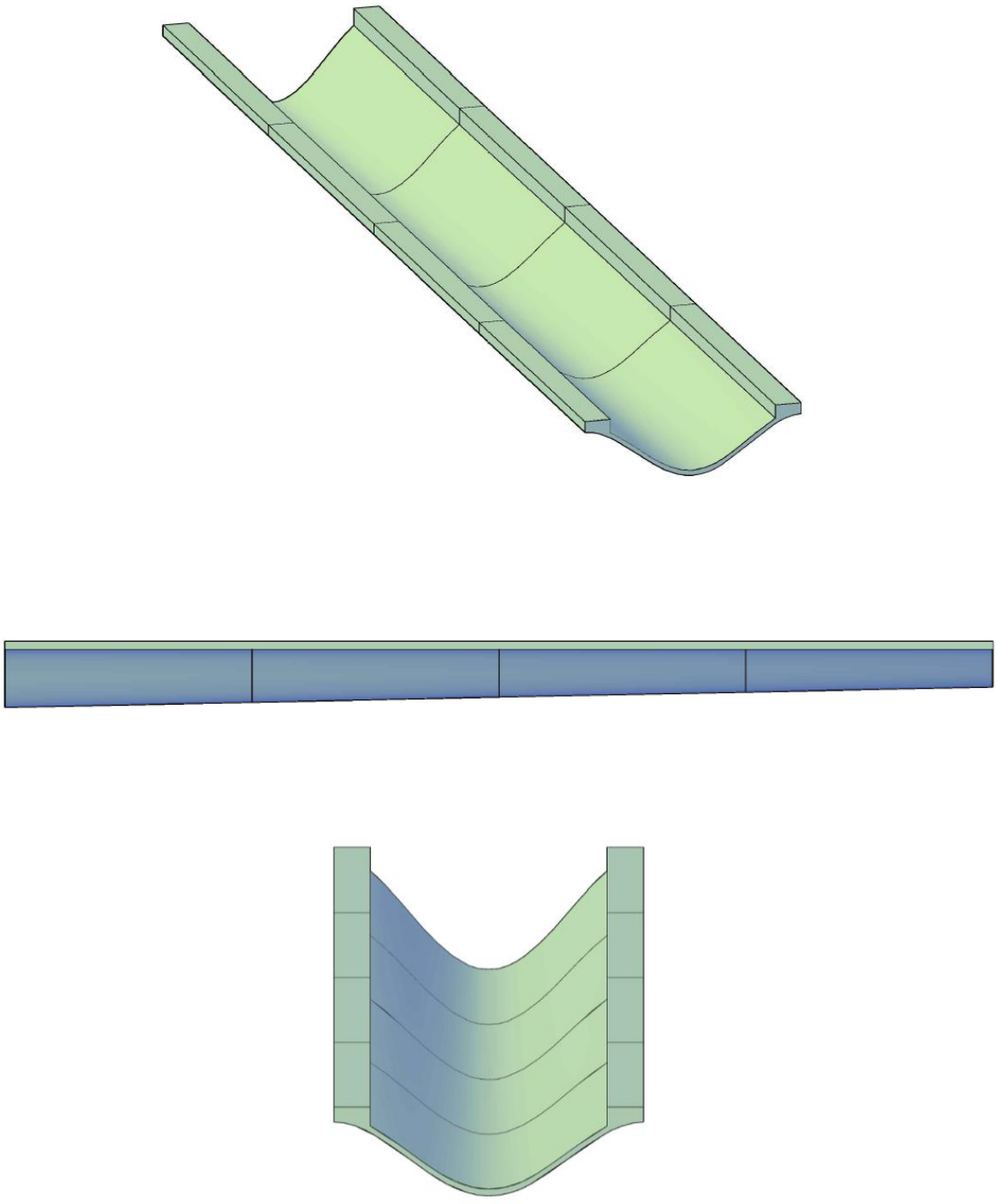


Figura 134 : Viste della trave ondulata in 3D

7. Analisi dei materiali da costruzione

7.1 Demolizione del campione in laboratorio

Durante la campagna indagini nel padiglione C, tramite endoscopia su una trave del solaio perimetrale sono stati prelevati due elementi in ferrocemento. Uno di questo è stato inviato al laboratorio di ricerca della Buzzi Unicem, azienda produttrice di cemento che ha assorbito le aziende che hanno prodotto il cemento per la costruzione dei padiglioni di Nervi, il secondo frammento invece destinato al laboratorio del Politecnico.

Figura 135 : Prelievo dei frammenti di ferrocemento e vista dell'interno della trave

L'obiettivo dell'analisi di laboratorio è stata quella di verificare il numero corretto di strati della rete utilizzata da Nervi, viste le difformità provenienti dai disegni di archivio, e quella di capire la tipologia di rete utilizzata.

Lo spessore dell'elemento era di circa 25 mm, in linea con quanto riportato nei disegni, visto che ha uno spessore variabile dai 20 mm nella parte più alta della curva, fino ad arrivare a 40 mm nella zona a maggiore curvatura.

Figura 136 : Stato iniziale

Utilizzando martello e scalpello è stato rimosso poco alla volta lo strato di malta che copriva il primo strato di rete metallica.

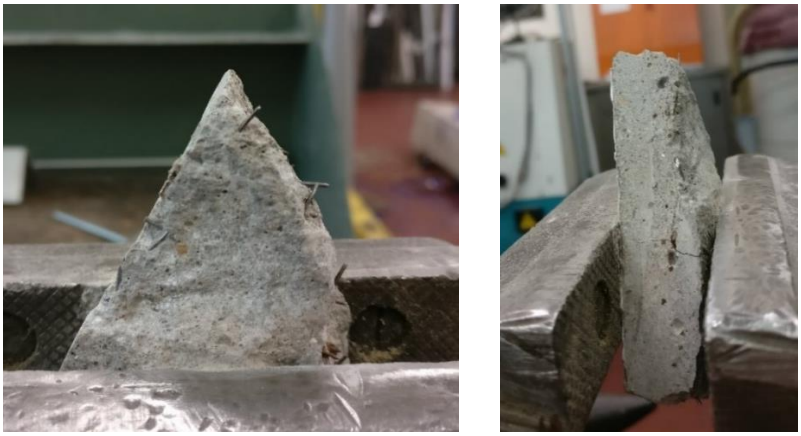


Figura 137 : Lavorazioni

L'operazione non è stata di rapida esecuzione dato che la malta si è presentata molto dura e compatta, difficile da rimuovere se non polverizzandola.

Continuando la lavorazione il pezzo ha cominciato a presentare fessure, quindi il lavoro si è complicato, soprattutto per evitare il danneggiamento delle reti.

A metà lavorazione è stato utilizzato un abrasore elettrico, dato il gran numero di fessure che rendevano l'utilizzo di martello e scalpello notevolmente complicato.

Figura 138 : Utilizzo di abrasore elettrico

Ogni volta che uno strato di malta veniva rimosso, la rete che ne fuoriusciva veniva posizionata su un foglio e catalogata. Il tutto è stato ripetuto fino alla completa estrazione di ogni strato di rete.

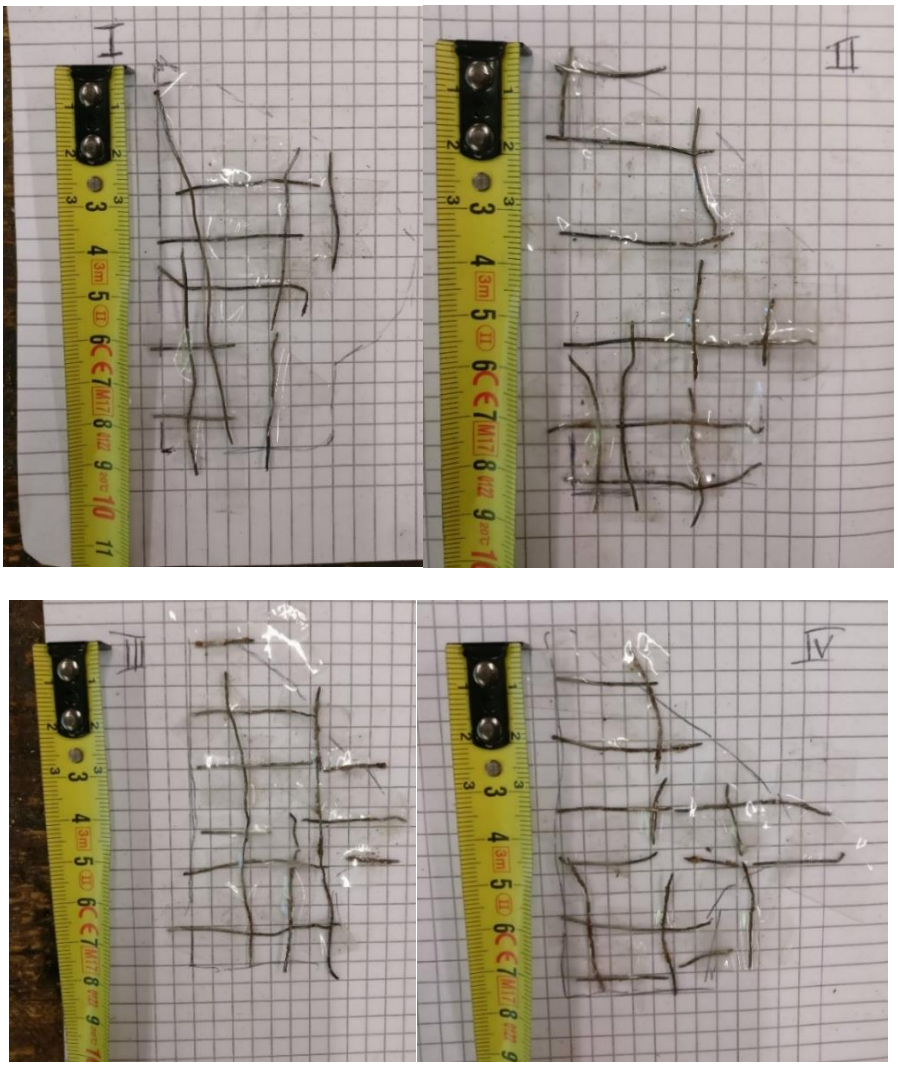


Figura 139 : Risultato Estrazione Reti di armatura

Come risultato si sono rilevati:

- 4 strati di rete metallica, contrariamente ai 6 (3+3) indicati nelle tavole grafiche;
- Rete metallica con una maglia prevalentemente rettangolare di circa 1cm x 1.5cm;
- Fili di acciaio dolce di diametro circa 1mm, intrecciato, quindi non saldato, in modo da formare una rete tessuta in acciaio;

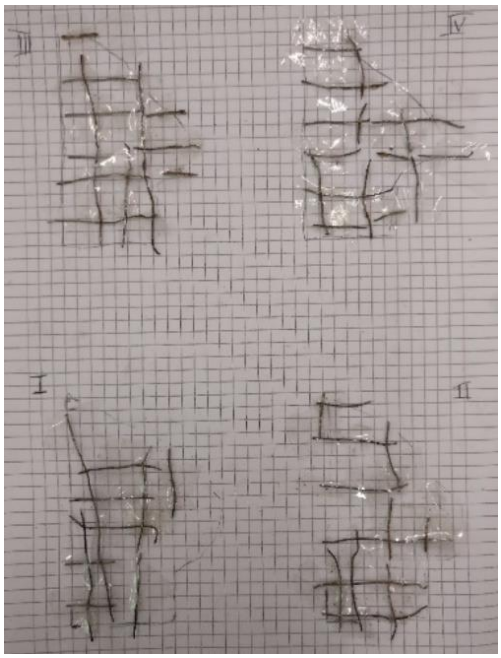


Figura 140 : Risultato finale

7.2 Analisi della malta

Il secondo dei due frammenti di ferrocemento estratti è stato inviato al laboratorio della Buzzi Unicem che ha effettuato un'analisi sulla composizione della malta, i cui risultati vengono illustrati di seguito.

Una porzione del campione è stata sottoposta ad una analisi chimica semiquantitativa tramite spettrometria di fluorescenza a raggi X. I risultati sono riassunti in tabella 1. La perdita in peso per calcinazione (ppc) è stata determinata con analisi termogravimetrica a 950°C. L'analisi mineralogica per diffrazione a raggi X è stata effettuata su due frazioni setacciate a 1 mm e a 150 µm per ridurre il contenuto di aggregato ed incrementare la componente di legante.

Elemento (ossido)	% in peso	Elemento (ossido)	% in peso
ppc	17,72	TiO_2	0,32
SiO_2	41,28	P_2O_5	0,12
CaO	22,73	MnO	0,11
Fe_2O_3	6,30	BaO	0,09
Al_2O_3	6,14	SrO	0,06
MgO	2,23	Cr_2O_3	0,03
K_2O	1,41	Cl	0,02
SO_3	0,73	NiO	0,02
Na_2O	0,66	CuO	0,02

Tabella 1 : Risultati analisi chimica quantitativa

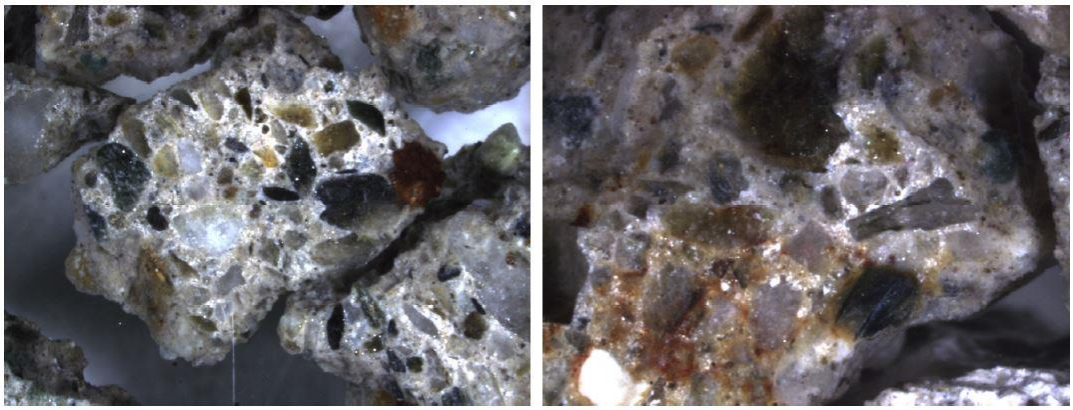


Figura 141 : Immagine al microscopio di due frammenti (15x a sinistra e 25x a destra)

Alcuni frammenti invece sono stati inglobati in resina e lucidati per un'analisi microscopica che ha mostrato frammenti di aggregati di forma irregolare e dimensioni genericamente inferiori a 1mm, inglobati in un legante di colore chiaro. La forma e la composizione degli aggregati suggerisce la provenienza da alveo fluviale. Sono presenti poi evidenti depositi ferruginosi.

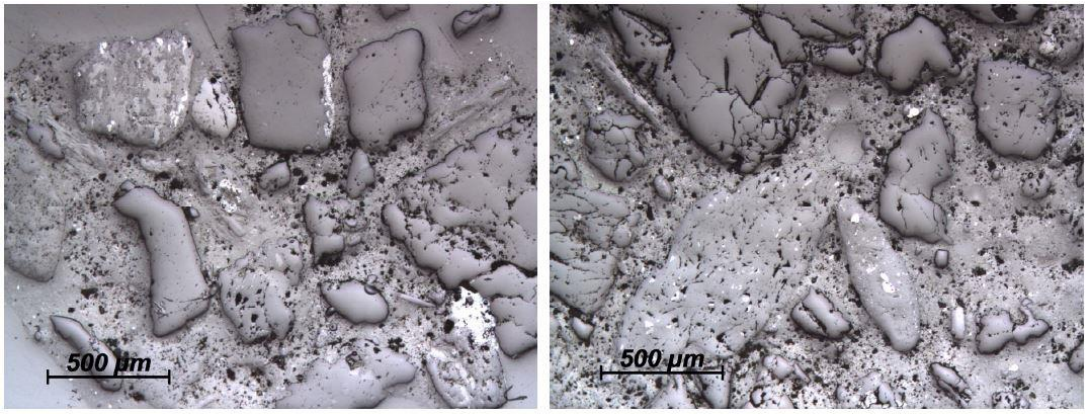


Figura 142 : Immagine al microscopio ottico a luce riflessa

Infine, è stata realizzata una diffrazione sulle frazioni dei campioni setacciati a 1mm e a 150 µm, ai vari picchi è stata assegnata la fase mineralogica.

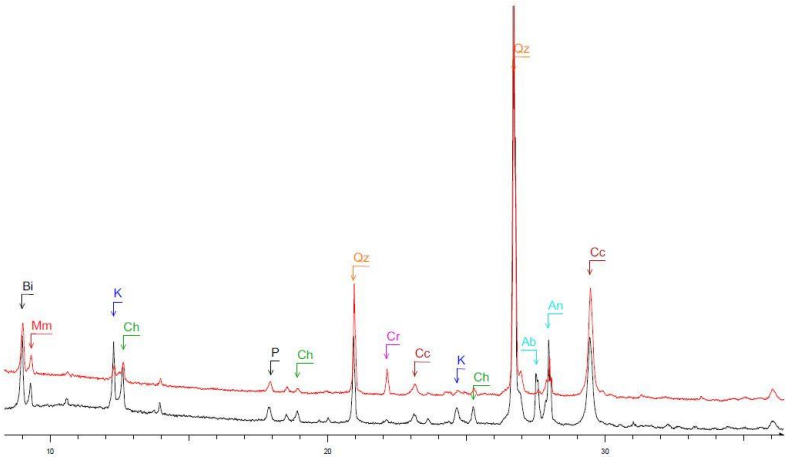


Figura 143 : Diffrattogrammi, Bi=Biotite; Mm=mormollinite; Ch=clorite; P=portlandite; Qz=quarzo; Cr=cristobalite; Cc=calcite; Ab=albite; An=anortite

Fase (%)	Frazione < 1 mm	Frazione < 150 µm
Portlandite	0,6	0,7
Calcite	18,4	26,1
Quarzo	44,2	44,1
Anortite	8,8	3,9
Albite	5,5	2,4
Microclino	7,8	3,5
Biotite	3,9	3,3
Montmorillonite	3,0	3,6
Clorite	3,5	4,0
Kaolinite	4,3	6,4
Cristobalite	--	2,0

Tabella 2 : Fasi mineralogiche

La setacciatura porta ad un arricchimento in calcite, ma non emergono indicazioni relative alla presenza di materiali cementizi supplementari né di fasi idrate della pasta ad eccezione della portlandite.

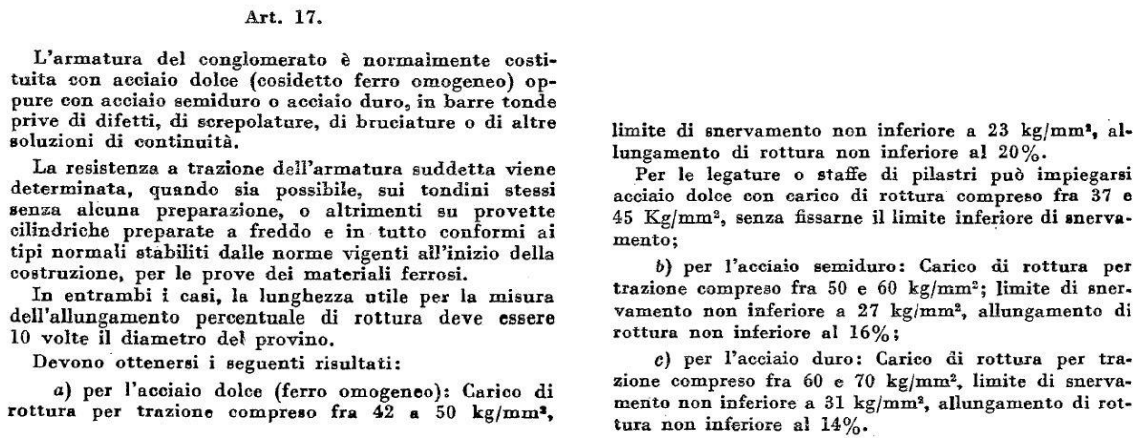
In conclusione, quello che si evince è un materiale ad alto contenuto di cemento portland, con delle fasi mineralogiche dovute alla tipologia di aggregato sabbioso da alveo e altre fasi che stanno ad indicare un processo di carbonatazione del cemento dovuto alla penetrazione di anidride carbonica, altre fasi sono giustificate dalla presenza nella miscela iniziale di farina fossile o bentonite, aggiunta nella malta per renderla sufficientemente plastica da essere spalmata sulle reti metalliche senza colare.

7.3 Scelta delle barre di armatura

All'epoca della costruzione dei padiglioni di Torino Esposizioni era in vigore il Regio Decreto del 1939 come normativa per le costruzioni in cemento armato ed erano ovviamente molto meno stringenti e caratterizzate rispetto a quelle attuali.

Nel 1947, anno di progettazione del padiglione C, le armature utilizzate per la costruzione di manufatti cementizi erano delle barre lisce, realizzate in tre tipologie di acciaio semplicemente chiamate come "dolce", "semi duro" e "duro".

Con questa nomenclatura si identificavano tre valori di snervamento e rottura caratteristici per ogni acciaio come riportato nell'estratto della normativa sottostante.



Art. 17.

L'armatura del conglomerato è normalmente costituita con acciaio dolce (cosidetto ferro omogeneo) oppure con acciaio semiduro o acciaio duro, in barre tonde prive di difetti, di screpolature, di bruciature o di altre soluzioni di continuità.

La resistenza a trazione dell'armatura suddetta viene determinata, quando sia possibile, sui tondini stessi senza alcuna preparazione, o altrimenti su provette cilindriche preparate a freddo e in tutto conformi ai tipi normali stabiliti dalle norme vigenti all'inizio della costruzione, per le prove dei materiali ferrosi.

In entrambi i casi, la lunghezza utile per la misura dell'allungamento percentuale di rottura deve essere 10 volte il diametro del provino.

Devono ottenersi i seguenti risultati:

a) per l'acciaio dolce (ferro omogeneo): Carico di rottura per trazione compreso fra 42 a 50 kg/mm², limite di snervamento non inferiore a 23 kg/mm², allungamento di rottura non inferiore al 20%.

Per le legature o staffe di pilastri può impiegarsi acciaio dolce con carico di rottura compreso fra 37 e 45 Kg/mm², senza fissarne il limite inferiore di snervamento;

b) per l'acciaio semiduro: Carico di rottura per trazione compreso fra 50 e 60 kg/mm²; limite di snervamento non inferiore a 27 kg/mm², allungamento di rottura non inferiore al 16%;

c) per l'acciaio duro: Carico di rottura per trazione compreso fra 60 e 70 kg/mm², limite di snervamento non inferiore a 31 kg/mm², allungamento di rottura non inferiore al 14%.

Figura 144 : Estratto sulle armature del R.D.1939

Riportando i valori in MPa si ottiene:

- Resistenza a rottura di un acciaio dolce tra 420/500 MPa, snervamento non inferiore a 230 MPa e allungamento a rottura >20%;

- Resistenza a rottura di un acciaio semiduro tra 500/600 MPa, snervamento non inferiore a 270 MPa e allungamento a rottura >16%;

- Resistenza a rottura di un acciaio duro tra 600/700 MPa, snervamento non inferiore a 310 MPa e allungamento a rottura >14%; [13]

Per il progetto del padiglione sono state utilizzate tutte e tre le tipologie di acciaio, opportunamente scelte a seconda dell'elemento strutturale da realizzare.

Per la realizzazione delle travi del solaio ondulato sono state utilizzate le barre di acciaio dolce per le armature con diametro 5 mm, mentre per le barre di armatura con diametri 10 mm e 12 mm sono state utilizzate degli acciai semiduri.

Il problema di costruire il più fedelmente possibile l'elemento nel 2021 è che gli acciai per cemento armato lisci sono ormai fuori produzione da decenni, dato che l'adeguamento della normativa nel 1957 aveva già introdotto l'utilizzo di barre ad aderenza migliorata. [13]

Per avvicinarsi il più possibile ai valori di snervamento delle armature dell'epoca e soprattutto per replicare la presenza di barre lisce non nervate sono state scelte delle barre di acciaio da carpenteria metallica, S235 e S275.

Denominazione (vecchia)	Spessore t (mm)			
	$t \leq 40$ mm		40 mm $< t \leq 100$ mm	
	f_y (N/mm²)	f_u (N/mm²)	f_y (N/mm²)	f_u (N/mm²)
S235 Fe 360	235	360	215	360
S275 Fe 430	275	430	255	410
SS355 Fe 510	355	510	335	470

Figura 145 : Caratteristiche meccaniche barre di acciaio strutturale

In particolare, per le barre di diametro 5 mm sono state scelte delle barre trafilate in acciaio S235, mentre per le barre da 10 mm e 12 mm sono state scelte delle barre laminate in acciaio S275.

7.4 Progettazione cassero

Il primo step esecutivo per la realizzazione della trave ondulata in esame è la costruzione del cassero, supporto necessario per la posa e la corretta formatura delle reti di armatura metallica.

Si è pensato di realizzare una struttura in legno, non della stessa tipologia utilizzata ai tempi ma che abbia la stessa funzione.

L'idea è stata sviluppata utilizzando l'ambiente 3D di Autocad ed è composta da:

1) 13 pannelli in MDF (Multi Density Fibreboard) con spessore di 30 mm, distanziati 50 cm l'uno dall'altro. Sono dei pannelli con dimensioni 114 cm di larghezza e 60 cm di altezza e sono opportunamente sagomate in modo da avere la corretta sezione nella trave in quel punto;

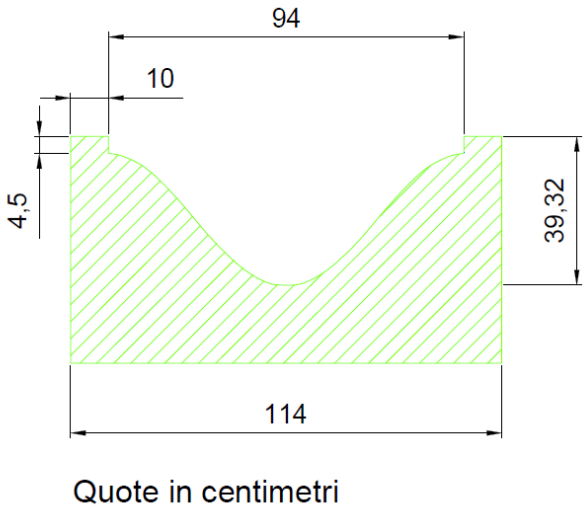


Figura 146 : Esempio di un pannello in MDF sagomato

2) Un foglio di lamierino in acciaio zincato, con spessore di 6/10 di mm, che viene tagliato e collegato con dei chiodi ai pannelli di mdf, utile per contenere il materiale che viene posato successivamente, quali reti metalliche e malta cementizia;
3) Tavole in legno di abete di spessore 25 mm e altezza 155 mm, opportunamente collegate tra di loro e che hanno la funzione di sostenere i pannelli e tutta la struttura;
4) Tavole in legno connesse in modo da realizzare agli estremi della trave due contenitori di dimensioni 20x114x50 cm, il loro scopo è quello di contenere un getto di calcestruzzo che va ad inglobare le armature longitudinali, correttamente ripiegate, realizzando quindi due blocchi di vero e proprio calcestruzzo. Un'altra funzione è quella del corretto posizionamento e aggancio alle macchine di prova per testare l'elemento ultimato;
5) Posizionate le reti metalliche, le barre di armatura e la malta cementizia, si attende il giusto periodo di presa e indurimento della malta e viene posizionato il necessario per realizzare e gettare il solaio di completamento.

Una volta ultimato l'elemento, viene scasserato, e stoccato utilizzando una trave in acciaio strutturale agganciata in tre punti e collegata ad una gru. L'intero processo viene ripetuto fino ad ottenere 4 elementi ondulati finiti e pronti per essere testati.

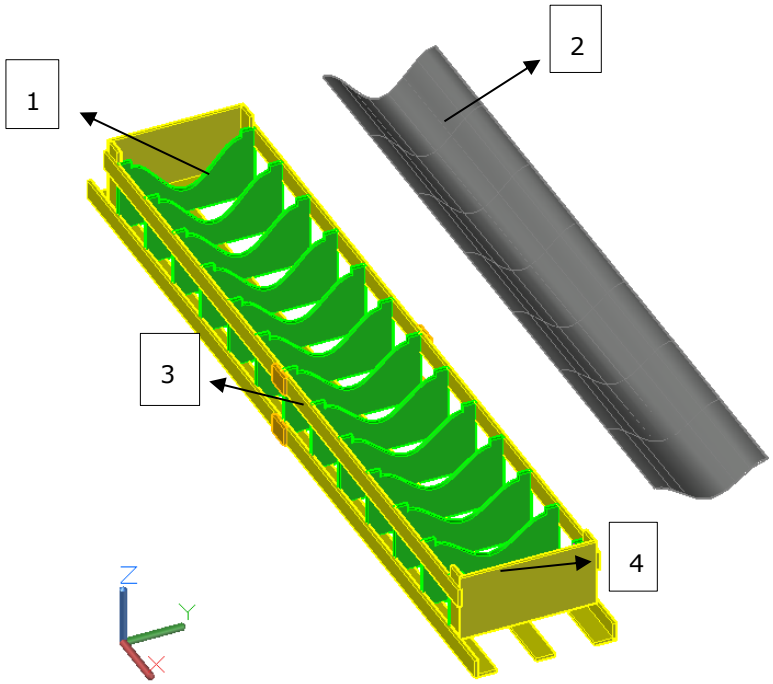


Figura 147 : Cassero ligneo in 3D

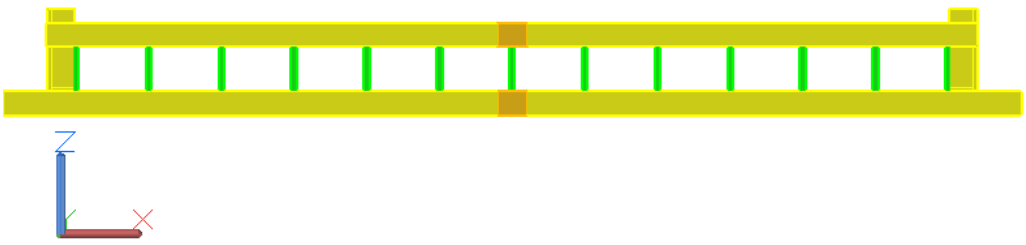


Figura 148 : Vista laterale del cassero

8. Conclusioni e sviluppi futuri

Questo elaborato si è focalizzato sull'analisi delle costruzioni in ferrocemento, illustrando la composizione e i principali utilizzi di questo materiale non molto conosciuto, spesso confuso con il classico cemento armato.

Sono state spiegate le sue caratteristiche e di come è stato utilizzato in diversi campi di applicazione grazie alla sua facilità di costruzione e reperibilità dei materiali. Il suo più grande pregio è la possibilità di ricreare qualsiasi forma senza costruire complesse casseforme e raggiungere degli spessori molto piccoli ma con ottime resistenze meccaniche e impermeabilità, per questo ha trovato largo spazio nella costruzione di serbatoi ed elementi strutturali che resistono per forma.

L'attenzione si è poi spostata al caso studio dei padiglioni di Torino Esposizioni progettati dall'Ingegner Pierluigi Nervi, il quale ha fatto largo utilizzo del ferrocemento per la realizzazione di elementi prefabbricati in serie ottimizzando il materiale e sfruttando al meglio le sue caratteristiche.

È stata ripercorsa la storia della costruzione dei padiglioni, delle sue dimensioni e degli elementi caratteristici che lo compongono, fino ad arrivare ad una analisi dello stato di conservazione attuale. Oltre ad una indagine visiva, infatti sono state effettuate diverse campagne sperimentali, quella trattata in questo lavoro è stata una analisi dello stato della corrosione degli elementi ad arco nel padiglione C e nei pilastri del padiglione B.

La parte finale della tesi si è concentrata sulla scelta e i passaggi esecutivi per la costruzione di un mockup in scala 1:1 di una trave ondulata in ferrocemento utilizzata largamente nel solaio ondulato del salone C. Sono state quindi analizzati e studiati i vari disegni originali presenti negli archivi CSAC di Parma, per poter capire nel dettaglio la composizione dell'elemento.

Successivamente quindi incrociando le informazioni con i brevetti originali sul ferrocemento depositati da Nervi e le informazioni scaturite dalle lavorazioni in laboratorio sono stati scelti e acquistati i materiali più idonei per la realizzazione. Realizzazione che può avvenire come step successivo alla messa in piedi di un adeguato cassero ligneo appositamente pensato e progettato per contenere e riprodurre in laboratorio il mockup.

Gli sviluppi futuri riguarderanno la realizzazione effettiva delle quattro travi, pronte per essere testate con delle prove a flessione e compressione in due condizioni particolari, una in cui la trave viene condizionata artificialmente per simulare il degrado per corrosione delle barre di armatura e l'altra in cui la trave è perfettamente integra, andando quindi a correlare l'effetto che la corrosione ha sugli elementi in ferrocemento.

Bibliografia

- *[1] Keeping it Modern – Planning Grant 2019- "The halls of Turin Exhibition Center by Pier Luigi Nervi: a multi- disciplinary approach for its diagnosis and preservation."*
- *[2] "Il ferrocemento: sue caratteristiche e possibilità", in "L'ingegnere", gennaio 1951*
- *[3] "Relazione Torinno Esposizioni", Prof. Napoli, Studio Sintecna, 2006*
- *[4] Brevetto "ferrocèment" di Joseph-Louis Lambot,1852*
- *[5] "Ferrocement & laminated cementitious composites"- Antoine E. Naaman*
- *[6] "Costruire correttamente", "B.com SPRL, 2012*
- *[7] "Come si costruisce oggi nel mondo"*, F. Carpanelli,1955
- *[8] "Aesthetics and Technology in Building"*, P.L. Nervi, 1965
- *[9] "The ferro cemento of Pier Luigi Nervi"*, C. Greco, 1995
- *[10] Manuale Giatec Icor*
- *[11] "Aspetti generali della corrosione", Enciclopedia Treccani*
- *[12] "Calcoli statici, salone C"*, Torino 1950
- *[13] "Regio Decreto 1939"*
- *"Tavole salone B e C, Torino Esposizioni",* Parma: CSAC, 1950