

Politecnico di Torino

Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

# Elementi in calcestruzzo armato precompresso: rilievo dei danneggiamenti e stima della capacità residua

Docente

Francesco Tondolo

**Candidato** Luciano d'Elia

**Co-relatore** Pierclaudio Savino

ANNO ACCADEMICO 2019 - 2020

# Sommario

La diagnosi dello stato di ammaloramento delle strutture esistenti in cemento armato e cemento armato precompresso risulta fondamentale per la valutazione della sicurezza.

La prima fase consiste in un'analisi conoscitiva delle cause che hanno provocato il danno: è necessario saper riconoscere, qualora ci siano, delle cause endogene del materiale o se e quali siano i fattori esterni a monte dell'attività di degrado.

Per poter effettuare una corretta diagnostica in opere come ponti e viadotti, in cui gli elementi strutturali non sono sempre di facile accesso per attività di ispezione o manutenzione, esistono diverse prove non distruttive utili ad orientare le necessarie e successive prove distruttive.

Una volta noti posizione, effetti e profondità del danneggiamento, risulta necessario adottare modelli adeguati per la stima delle caratteristiche meccaniche attuali dei materiali appartenenti alla struttura indagata e della capacità portante residua.

Le fasi descritte sono state seguite nel presente lavoro di tesi, che si configura come parte iniziale dello studio degli effetti corrosivi sulle travi precompresse appartenenti agli impalcati di un cavalcavia esistente, situato in C.so Grosseto (Torino).

Il lavoro svolto ha riguardato la mappatura del quadro fessurativo attraverso ricostruzione fotografica, la misurazione dell'ampiezza delle fessure attraverso cui sono stati stimati analiticamente gli effetti della corrosione sui trefoli appartenenti alle travi interne e di bordo. La ricostruzione fotografica del quadro fessurativo è stata eseguita anche su due pulvini.

L'attività sperimentale eseguita ha consentito di ottenere parametri utili a quantificare gli effetti di degrado sulla struttura e quindi stimare la riduzione tra la capacità portante di progetto e la capacità portante residua.

# Abstract

The diagnosis of the deterioration state of the reinforced and pre-stressed concrete existing structures is fundamental for the security assessment.

The first phase consists in a cognitive survey of damage causes: is necessary to be able to recognize if the damage is due to material properties or external factors coming from the environment.

Several non destructive tests, useful to orientate the necessary and subsequent destructive tests, are used to obtain a correct diagnosis in structures like bridges and viaducts in which the various elements are often difficult to be reached for inspection or maintenance activities.

Once known position, effects and depth of the damage, appropriate models are needed to estimate the mechanical properties and the residual bearing capacity of the investigated structures.

The described steps were followed in the current thesis, which is the beginning part of the study of the corrosion effects on the pre-stressed beams which were part of the deck of an existing overpass, located in C.so Grosseto (Turin).

The work consisted in the cracks mapping through photographic reconstruction and the analytical evaluation of the corrosion effects on the strands, belonging to the internal and border beams, through crack width measurement. The photographic reconstruction of the cracks pattern has been made also on the two pier caps.

The experimental activity allowed to determine parameters useful for the quantification of degradation effects on the structure and then the evaluation of the reduction between the projected bearing capacity and the residual one.

# Indice

Introduzione.		1
Capitolo 1 – I	Degrado e fessurazioni nelle strutture	3
1.1 Infl	uenza della temperatura durante l'indurimento	4
1.2 Fes	surazione da ritiro	7
1.2.1	Ritiro plastico	7
1.2.2	Ritiro autogeno	8
1.2.3	Ritiro igrometrico	8
1.3 Dila	avamento	10
1.4 Deg	grado da corrosione	11
1.4.1	Carbonatazione	11
1.4.2	Pitting	13
1.5 Deg	grado da attacco solfatico	15
1.5.1	External Sulphate Attack (ESA)	15
1.5.2	Internal Sulphate Attack (ISA)	17
1.5.3	Alkali-Silica Reaction (ASR)	17
1.6 For	mazione di ghiaccio	19
1.7 Il de	egrado nei ponti	21
Capitolo 2 – H	Effetti del degrado	23
2.1 Modif	ica del legame costitutivo dell'acciaio	23
2.2 Mo	difica del legame costitutivo del calcestruzzo	28
2.3 Mo	difica del legame di aderenza acciaio-calcestruzzo	30
Capitolo 3 – V	Valutazione dello stato di danno e diagnosi del degrado	31
3.1 Ispe	zioni	31
3.1.1	Scheda di valutazione ispettiva e metodo della valutazione numerica del danno (MVN)	32
3.2 Tecnic	che diagnostiche dell'ammaloramento – prove non distruttive	34
3.2.1 Te	ermografia	35
3.2.2 Ei	ndoscopia	36
3.2.3 M	lisure di depassivazione	36
3.2.4 M	lagnetometria	37
3.2.5 M	lisura del potenziale di corrosione	37
3.2.6 G	ammagrafia	38
3.2.7 At	uscultazione sonica	39
3.2.8 R	ilevamento degli ultrasuoni	40
3.2.9 Sc	clerometria	43

<i>3.2.10 Metodo Son-Reb</i>
3.2.11 Impact Echo (IE)
3.2.12 Ground Penetrating Radar (GPR)
3.2.13 Acoustic Emissions (AE)
3.2.14 Analisi Modale Sperimentale (EMA)
Capitolo 4 – Il caso studio
4.1 Operazioni e prelievi nel cantiere di Corso Grosseto
4.2 Valutazione della capacità portante di progetto
4.2.1 Ricerca prove in archivio
4.2.2 Caratteristiche geometriche e meccaniche
4.2.3 Momento resistente
4.2.3 Taglio resistente
4.3 Restituzione fotografica e misurazioni in cantiere
4.4 Valutazione numerica del degrado e delle resistenze attuali
4.5 Valutazione della capacità portante attuale e confronto
Conclusioni
Bibliografia e sitografia
Allegati

# Indice delle tabelle

Tabella 1: Calore di idratazione di alcuni cementi a vari tempi di idratazione
Tabella 2: Valori dei coefficienti correttivi del ritiro standard
Tabella 3: Valori dei coefficienti α in funzione della perdita di sezione (in percentuale)27
Tabella 4: Risultati delle prove sull'armatura da precompressione adottata nel cavalcavia di Corso Grosseto
Tabella 5: Caratteristiche meccaniche delle travi precompresse    67
Tabella 6: Proprietà geometriche delle sezioni di calcolo    68
Tabella 7: Perdite di tensione e lunghezza di ancoraggio dei trefoli70
Tabella 8: Posizione asse neutro, deformazione del calcestruzzo e momento resistente delle sezioni di calcolo
delle travi a T71
Tabella 9: Posizione asse neutro, deformazione del calcestruzzo e momento resistente delle sezioni di calcolo
delle travi di bordo73
Tabella 10: Resistenze delle armature a seguito della corrosione    81
Tabella 11: Posizione asse neutro, deformazione del calcestruzzo e momento resistente delle sezioni di
calcolo delle travi a T allo stato corroso
Tabella 12: Posizione asse neutro, deformazione del calcestruzzo e momento resistente delle sezioni di
calcolo delle travi di bordo allo stato corroso

# Indice delle figure

Figura 1: Incremento di temperatura in un calcestruzzo in condizioni adiabatiche [1]	. 4
Figura 2: Variazione della temperatura e gradienti termici in un calcestruzzo in condizioni non adiabatiche	
[1]	. 5
Figura 3: Fessurazione di un calcestruzzo massivo [12]	. 5
Figura 4: Influenza della UR sulla resistenza meccanica [1]	. 7
Figura 5: Fessurazione da ritiro plastico [40]	. 8
Figura 6: Ritiro standard a 6 mesi misurato in laboratorio [1]	. 9
Figura 7: Effetti del dilavamento da cloruro di calcio sul calcestruzzo	10
Figura 8: Schematizzazione delle reazioni di corrosione [39]	11
Figura 9: Esempio di corrosione post-carbonatazione	12
Figura 10: Profondità del fronte carbonatato in funzione del tempo e di K	12
Figura 11: Corrosione da cloruri di elementi in calcestruzzo in condizioni semi-immerse	13
Figura 12: Profili di diffusione dei cloruri nel calcestruzzo in funzione del tempo e al variare del coefficient	te
di diffusione D	14
Figura 13: Effetti della corrosione sulle pareti di un canale in calcestruzzo [1]	15
Figura 14: esempio di comparsa di ettringite secondaria nei vuoti attorno alle particelle di aggregato [33]	16
Figura 15: Differenza tra un provino integro immerso in acqua (a sinistra), in acqua solfatica con formazion	ıe
di ettringite (al centro), in acqua solfatica con formazione di thaumasite (a destra) [1]	16
Figura 16: Microfessurazione a ragnatela dovuta ad ASR	18
Figura 17: Macrofessurazione irregolare da ASR	18
Figura 18: Influenza dello spacing tra le bolle d'aria sulla durabilità di una struttura in calcestruzzo [1]	19
Figura 19: Effetti del degrado dovuto alla formazione di ghiaccio [34] [35]	20
Figura 20: Sezione di un trefolo soggetto a rottura fragile ed effetti sulle strutture precompresse	21
Figura 21: Errori costruttivi nella disposizione delle armature [31]	22
Figura 22: Errori costruttivi nella protezione del calcestruzzo [31]	22
Figura 23: Errori costruttivi nella canalizzazione delle acque in opere in calcestruzzo [31]	22
Figura 24: Accumulo di acqua attorno alle armature a causa del bleeding del calcestruzzo [1]	22
Figura 25: Perdita di duttilità al variare della percentuale di corrosione (da Almusallam [29])	23
Figura 26: Schematizzazione della perdita di sezione di una barra a causa della corrosione [25]	24
Figura 27: Andamento della profondità di penetrazione ad inizio cracking al variare del rapporto tra il	
copriferro e il diametro delle barre (da Alonso et al. [24])	24
Figura 28: Valori di apertura di una fessura al variare della perdita di area (da Vidal et	25
Figura 29: Variazione del legame di aderenza in funzione della percentuale di corrosione [22]	30
Figura 30: Scheda di valutazione ispettiva per la valutazione del degrado dei ponti	33

Figura 31: Esempio di una scansione termografica di un edificio [36]	35
Figura 32: Prove di carbonatazione [37] e di penetrazione ioni cloruro [1] su provini in calcestruzzo	36
Figura 33: Indicazioni della norma ASTM C 876-91 per l'identificazione del livello di corrosione [5] [32]	].38
Figura 34: Mappatura del potenziale all'interno di una trave in calcestruzzo	38
Figura 35: Rilevamento di una fessura in un palo di fondazione mediante auscultazione sonica [1]	39
Figura 36: Tipologie di rilevamento di ultrasuoni	41
Figura 37: Curva velocità ultrasonica - resistenza a compressione [4]	41
Figura 38: Sclerometro Schmidt [4]	43
Figura 39: Curva indice di rimbalzo-resistenza cubica a compressione [4]	44
Figura 40: Curve di isoresistenza - Metodo SonReb [4]	46
Figura 41: Differenza nelle frequenze rilevate in calcestruzzo integro (a), in presenza di acciaio (b) e di	
difetti (c) [19]	48
Figura 42: Impactechogramma ottenuto dalla prova Impact Echo [6]	48
Figura 43: Radargramma ottenuto durante la prova GPR [27]	50
Figura 44: Forma dei difetti ortogonali alla linea di scansione [27]	50
Figura 45: Forma dei difetti paralleli alla linea di scansione [27]	50
Figura 46: Andamento delle emissioni acustiche in funzione del livello di danno (basso a sinistra, alto a	
destra) [20]	51
Figura 47: Misura del segnale - Ring Down Counting (a sinistra) e Counting Events (a destra) [20]	52
Figura 48: Confronto tra deformata modale teorica e quella elaborata attraverso EMA [38]	54
Figura 49: Travi prelevate dagli impalcate del cavalcavia di Corso Grosseto	55
Figura 50: Identificazione delle travi appartenenti alla campata avente come estremi la pila 47 e la pila 4	46
Figura 51: Posizione dei carotaggi effettuati sulla pila 47 ed esecuzione dei carotaggi	57
Figura 52: Provini dopo il test di carbonatazione e barra 49-2 con relative staffe appartenenti alla pila 49	57
Figura 53: Sistemi di riferimento adottati per i carotaggi	58
Figura 54: Pianta relativa alla disposizione delle travi nel sito di Mirafiori	59
Figura 55: Classificazione dei provini e delle barre prelevati - Pila 46	60
Figura 56: Classificazione dei provini e delle barre prelevati - Pila 47	61
Figura 57: Classificazione dei provini e delle barre prelevati - Pila 49	62
Figura 58: Esempio di una prova a trazione eseguita sui trefoli precompressi del cavalcavia di corso Gross	seto
	63
Figura 59: Esempio di diagramma tensione-deformazione ottenuto da una prova a trazione	64
Figura 60: Sezione tipologica trave a T	67
Figura 61: Sezione tipologica trave di bordo	67
Figura 62: Sezioni di calcolo del momento resistente delle travi a T con relativi trefoli attivi	71
Figura 63: Momento resistente relativo alle travi a T	72

Figura 64: Sezioni di calcolo del momento resistente delle travi di bordo con relativi trefoli attivi73
Figura 65: Momento resistente delle travi di bordo74
Figura 66: Passo staffe e diagramma di taglio resistente relativi alla trave T6-P47/P4676
Figura 67: Passo staffe e diagramma di taglio resistente relativi alla trave C2-SP/P4778
Figura 68: Ricostruzione dei prospetti laterali e intradosso della trave T6-P47/P4679
Figura 69: Trefoli inferiori (a sinistra) e superiori (a destra) considerati corrosi nella stima della capacità
portante80
Figura 70: Sezioni di calcolo del momento resistente delle travi a T allo stato corroso
Figura 71: Diagramma di momento e taglio resistente relativi alla trave T6-P47/P46 allo stato corroso83
Figura 72: Diagramma di momento e taglio resistente relativi alla trave C2-SP/P47 allo stato corroso85
Figura 73: Confronto tra il momento resistente di progetto e quello allo stato corroso relativi alla T6-P47/P46
Figura 74: Confronto tra il taglio resistente di progetto e quello allo stato corroso relativi alla T6-P47/P4686
Figura 75: Confronto tra il momento resistente di progetto e quello allo stato corroso relativi alla C2-SP/P47
Figura 76: Confronto tra il taglio resistente di progetto e quello allo stato corroso relativi alla C2-SP/P4787

# Introduzione

La vulnerabilità del calcestruzzo armato e del calcestruzzo precompresso è un problema che affligge la maggior parte delle strutture e infrastrutture in tutto il mondo: una situazione grave, sottolineata da numerosi studi e controlli.

Ne è un esempio l'indagine effettuata dall'American Road and Transportation Builders Association, nota con l'acronimo "ARTBA", che nel 2014 ha denunciato la necessità di adozione, da parte degli Stati Uniti, di un piano di intervento da 2 trilioni di dollari per il risanamento di 244.282 ponti con necessità di manutenzione (circa il 40%) e di cui circa 47.000 risultano a rischio.

Alla luce di queste problematiche, da diversi anni si è posta sempre più attenzione ai fenomeni di ammaloramento delle strutture, cercando metodi sempre più efficaci per una rapida ed efficace diagnosi.

Tra questi, risultano di crescente implemento le prove non distruttive, le quali permettono la stima dello stato di danno dei materiali indagati, diminuendo al contempo il numero di prove tradizionali (compressione del calcestruzzo, trazione delle armature, flessione su 3 o 4 punti ecc.) da dover effettuare per una caratterizzazione adeguata.

Gli studi effettuati in questi anni hanno così permesso sia lo sviluppo di nuove modalità di prova in sito, sia lo sviluppo di modelli che permettano, attraverso la misurazione di alcuni parametri come l'apertura delle fessure e la profondità di corrosione, la stima dei parametri meccanici di strutture soggette a degrado.

Tali studi presentano tuttavia una problematica comune: i provini sottoposti a test sono spesso soggetti ad un ammaloramento artificiale e accelerato, indotto attraverso basse e costanti densità di corrente.

Per questo motivo, lo smantellamento del cavalcavia sito in Corso Grosseto a Torino ha rappresentato una grande opportunità di raccolta dati su una struttura soggetta a degrado naturale generato dall'esposizione all'ambiente esterno.

Il lavoro di questa tesi si è quindi concentrato sull'ispezione, sui prelievi di campioni e sulla misurazione delle fessure presenti sugli elementi strutturali prelevati dal cavalcavia.

In questo modo, attraverso le diverse formulazioni presenti in letteratura, è stato possibile effettuare una stima iniziale del livello di corrosione e delle caratteristiche meccaniche attuali

dei materiali costituenti l'infrastruttura, permettendo così la determinazione della capacità portante residua ed un suo confronto con la capacità portante iniziale.

# Capitolo 1 – Degrado e fessurazioni nelle strutture

Il cemento armato e il cemento armato precompresso sono materiali che col tempo hanno dimostrato numerose problematiche dovute all'alterazione delle loro proprietà fisico-meccaniche a causa dell'esposizione ambientale, all'interazione con sostanze che innescano reazioni chimiche con la componente lapidea o con le armature presenti, a stati di sollecitazione elevati o non compatibili con la funzione della struttura, a stati di fatica e a variazioni di temperatura.

Di conseguenza, gran parte delle strutture appartenenti al secolo scorso e tuttora presenti mostra fenomeni di degrado dovuti ad una vulnerabilità intrinseca del materiale sconosciuta durante le fasi di progettazione e costruzione.

Per questo motivo, risulta fondamentale monitorare e saper riconoscere la presenza di fenomeni di ammaloramento delle strutture, in modo da poter valutare la loro durabilità e l'eventuale necessità di interventi atti a ripristinare un livello di sicurezza tale da poter rendere la struttura agibile.

Il degrado, riconoscibile attraverso un semplice sopralluogo o tramite indagini specifiche, si manifesta in più modi: può generare variazioni nell'aspetto estetico di una struttura o quadri fessurativi diversi per aspetto o per posizione delle fessure a seconda delle reazioni chimiche instauratesi.

#### 1.1 Influenza della temperatura durante l'indurimento

Una causa endogena delle fessurazioni del calcestruzzo è quella dovuta all'idratazione del cemento.

L'idratazione genera una reazione esotermica nei composti del clinker, con conseguente sviluppo di calore e riscaldamento della pasta cementizia.

Il calore  $q_t$  generato è definito dalla seguente legge:

$$q_t = \frac{m * \rho * \Delta t}{c}$$

dove:

- qt (kJ/kg) è il calore di idratazione unitario del cemento al tempo t;
- m (kg/m<sup>3</sup>) è il peso specifico della miscela, pari a 2400 kg/ m<sup>3</sup>;
- ρ (kJ/(kg\*c)) è il calore specifico del calcestruzzo, pari a circa 1,1 kJ/(kg\*c);
- c (kg/m<sup>3</sup>) è il dosaggio di cemento nel calcestruzzo.

In condizioni adiabatiche, quindi, la temperatura crescerebbe asintoticamente fino ad un massimo che dipende dal rapporto acqua/cemento, dalla quantità di composti puri ad alto calore di idratazione all'interno della miscela, dalla finezza di macinazione del cemento (Figura 1).



Figura 1: Incremento di temperatura in un calcestruzzo in condizioni adiabatiche [1]

Nelle strutture reali, a contatto con i casseri o esposte all'ambiente, la dissipazione di calore inizia a prevalere sul calore generato dalle reazioni di idratazione dopo 2-3 giorni, rendendo la parte corticale del manufatto più fredda del nucleo e creando così uno stato tensionale di compressione in quest'ultimo e uno stato di trazione nella periferia (Figura 2).



Figura 2: Variazione della temperatura e gradienti termici in un calcestruzzo in condizioni non adiabatiche [1]

Se, ad un livello di indurimento del calcestruzzo tale da garantirgli un modulo elastico elevato, il gradiente termico così generato dovesse superare i 20°C, le deformazioni viscose della miscela non riuscirebbero a compensare gli effetti dovuti alle tensioni di trazione instauratesi e avverrebbe fessurazione.



Figura 3: Fessurazione di un calcestruzzo massivo [12]

La fessurazione più insidiosa, tuttavia, si può verificare durante le fasi di raffreddamento, in cui il calcestruzzo è maggiormente indurito e non può contrarsi a causa dell'interazione con altri elementi della costruzione cui l'elemento che si raffredda è solidale (Figura 3).

Ciò comporta la nascita di tensioni di trazione da ritiro impedito, le quali generano fessure nel nucleo dell'elemento, non visibili e di conseguenza più pericolose.

Tali fenomeni appena descritti possono essere particolarmente presente in getti massivi di grandi strutture in cui i contenuti di cemento prescritti ai fini della durabilità possono determinare delle problematiche sulla qualità e monoliticità dei manufatti se non sufficientemente corredati da valutazioni tecnologiche sui rischi derivanti da incontrollati sviluppi di calore e senza opportune prescrizioni sulle regole elementari di esecuzione nonché sulle procedure di maturazione dei getti.

Per questo motivo, risultano fondamentali non solo particolari costruttivi quali la presenza di armatura atta ad assorbire le tensioni di trazione durante la maturazione del calcestruzzo e un idoneo isolamento termico dello stesso, ma anche un attento studio della miscela, reso possibile attraverso la Tabella 1, la quale permette di scegliere il cemento più adatto in funzione del calore di idratazione  $q_t$  da esso prodotto:

Tempo (giorni)	Cemento							
	I	II-A/L	III-B	IV-B	V-B			
	52,5 R	42,5 R	32,5 R	42,5 R	32,5 R			
1	200	130	60	85	70			
3	350	315	160	195	170			
7	400	375	200	230	210			
28	440	420	250	300	270			

Tabella 1: Calore di idratazione di alcuni cementi a vari tempi di idratazione

## 1.2 Fessurazione da ritiro

Il ritiro avviene in seguito alla perdita di acqua da parte del calcestruzzo e, se incontrollato, può rendere una struttura vulnerabile a causa della maggior porosità del copriferro o ad un decadimento delle prestazioni meccaniche durante la maturazione (Figura 4).



Figura 4: Influenza della UR sulla resistenza meccanica [1]

Esistono tre manifestazioni, temporalmente sfalsate, di questo fenomeno: il ritiro plastico, il ritiro autogeno e il ritiro igrometrico.

#### 1.2.1 Ritiro plastico

Questo tipo di ritiro avviene quando la miscela si trova ancora nella fase plastica del getto a causa dell'evaporazione dell'acqua verso un ambiente insaturo di vapore, cioè avente un umidità relativa UR<95%.

Il fenomeno genera fessurazione quando la velocità di evaporazione dell'acqua risulta superiore a 1 kg/(m<sup>2</sup>\*ora) e interessa maggiormente calcestruzzi non adeguatamente protetti, maturati in ambienti ventilati o asciutti o ad alte temperature, pavimenti, calcestruzzi proiettati.

La nascita delle fessure è dovuta quindi ad un essicamento ed una conseguente contrazione della parte epidermica della struttura, contrazione impedita dallo strato sub-corticale che rimane protetto e non esposto al ritiro.

In questo modo, la nascita di tensioni di trazione, di modesta entità ma ugualmente pericolose durante le prime fasi del getto, determina l'insorgenza di cavillature che possono facilitare l'ingresso di agenti pericolosi e promuovere fenomeni di degrado del manufatto (Figura 5).



Figura 5: Fessurazione da ritiro plastico [40]

#### 1.2.2 Ritiro autogeno

Il ritiro autogeno è un "auto-essiccamento" che avviene, successivamente a quello plastico, in assenza di variazioni di temperatura e umidità.

Esso è generato dalla mancanza di acqua nei pori interstiziali della pasta cementizia e si manifesta nei calcestruzzi ad alte prestazioni, caratterizzati da un rapporto acqua/cemento<0,40 e non adeguatamente trattati attraverso bagnature frequenti o aggiunta di additivi fluidificanti.

Anche in questo caso, è possibile che nascano fessure tali da promuovere il degrado della struttura.

#### 1.2.3 Ritiro igrometrico

Il ritiro igrometrico si manifesta nei calcestruzzi induriti durante la loro vita di esercizio in ambienti con UR<95%.

Esso dipende dalla composizione del materiale, dalla percentuale di ferri d'armatura, dalla geometria della struttura, dal modulo elastico dell'inerte adottato e dal tempo trascorso nell'ambiente insaturo.

Generalmente, i suoi effetti vengono mitigati dalla presenza di fenomeni viscosi all'interno del calcestruzzo, i quali possono impedire che le sollecitazioni superino la resistenza a trazione del materiale.

Il calcolo del ritiro igrometrico è possibile attraverso la seguente legge:

$$S = S_0 * f_1 * f_2 * f_3 * f_4 * f_5$$

dove:

S<sub>0</sub> è il ritiro standard a 6 mesi misurato in laboratorio su provini 10x10x50 cm privi di armatura, esposti in ambienti con UR=50%, a 20°C e dipendente dal rapporto a/c e i/c (inerte/cemento), come mostrato in Figura 6;



Figura 6: Ritiro standard a 6 mesi misurato in laboratorio [1]

• f<sub>i</sub> sono i coefficienti di correzione che permettono di adattare il calcolo standard ad ogni caso reale e mostrati in Tabella 2:

Coefficiente       correttivo f1 per il       tempo t       t     f1		Coefficiente correttivo f <sub>2</sub> per l'umidità relativa (UR)		Coefficiente correttivo f <sub>3</sub> per lo		Coefficiente correttivo f <sub>4</sub> per la		Coefficiente correttivo f <sub>5</sub> per il modulo elastico dell'inerte (E)			
1 sett.	0,20	UR%	f <sub>2</sub>	ambiente	spessore fittizio (n)		percentuale di		Tino di inarta	E (Gna)	f
1 mese	0,55	40	1 10	molto asciutto	h (cm)	f <sub>3</sub>	۸ (%)	f	ripo di merte	r (Oba)	15
3 mesi	0,90	50	1,10		E 00	1.00	A (/0)	14	basalto	95,00	0,60
6 mesi	1,00	50	1,00	molto asciutto	5,00	1,00	0.00	1 00	quarzo	85.00	0 70
1 anno	1,10	60	0,90	all'aria aperta	10.00	0.85	0,00	1,00	quuizo	05,00	0,70
2 anni	1,15	70	0.70	all'aria anerta	_0,00	0,00	0.15	0.97	granito	50,00	0,90
5 anni	1,25	70	0,70		20,00	0,65	0)10	0,57	calcare	10.00	1.00
10 anni	1,30	80	0,50	in ambiente chiuso	20.00		0.50	0.93	Calcale	40,00	1,00
20 anni	1.40	90	0,30	molto umido	30,00	0,55	4.00	0,00	dolomia	40,00	1,00
	_, 10	95	0,00	molto umido	40,00	0,45	1,00	0,85	argilla esp.	20,00	2,00
30 anni	1,45	100	0,00	saturo	50,00	0,40	2,00	0,70	arenaria	10,00	3,00

# 1.3 Dilavamento

Il dilavamento consiste nell'asportazione per erosione di materiale superficiale idrosolubile appartenente alla matrice cementizia da parte dell'acqua corrente.

Tale azione comporta la perdita di calce ed un conseguente aumento di porosità e permeabilità del calcestruzzo, le quali non solo espongono maggiormente la struttura agli agenti aggressivi, ma ne diminuiscono le caratteristiche meccaniche.

Il fenomeno può essere aggravato da acque a carattere acido (pH<6) per la presenza di anidride carbonica aggressiva, di sostanze acide appartenenti a scarichi industriali o di acido solforico di origine organica proveniente da acque reflue di fognature.

Risulta un'azione assimilabile al dilavamento anche quella effettuata dal cloruro di calcio presente all'interno del sale disgelante adoperato sulle strade, il quale agisce sull'idrossido di calcio CaOH<sub>2</sub> della pasta cementizia e lo asporta sotto forma di ossicloruro di calcio idrato (Figura 7):



 $3CaOH_2 + CaCl_2 + 12H_2O \rightarrow 3CaO * CaCl_2 * 15H_2O$ 

Figura 7: Effetti del dilavamento da cloruro di calcio sul calcestruzzo

#### **1.4 Degrado da corrosione**

La corrosione delle armature metalliche è un processo elettrochimico che avviene in presenza di un elettrolita (generalmente l'acqua) e che trasforma il ferro presente nell'acciaio d'armatura in ossido ferrico (Fe(OH)<sub>2</sub>) incoerente e voluminoso.

Il fenomeno si genera attraverso la creazione di una cella galvanica in cui l'anodo, rappresentato dal ferro, si ossida liberando elettroni all'interno del reticolo cristallino, mentre il catodo, rappresentato dall'ossigeno, si riduce generando ioni idrossido (Figura 8).



Figura 8: Schematizzazione delle reazioni di corrosione [39]

L'ossido ferrico così prodotto risulta 6-7 volte più grande dell'acciaio iniziale e il suo sviluppo comporta non solo un decadimento delle caratteristiche meccaniche della struttura, ma anche l'insorgenza di tensioni di trazione che fessurano ed espellono il copriferro.

Esistono due tipologie di corrosione: quella dovuta alla carbonatazione e quella dovuta ai cloruri.

#### 1.4.1 Carbonatazione

Successivamente alla fase di idratazione del cemento, si generano composti ad elevata basicità come la calce Ca(OH)<sub>2</sub>, che conferisce al calcestruzzo un pH>13 e permettono la passivazione delle armature metalliche, ovvero la formazione di uno strato di ossido ferrico impermeabile adeso al substrato metallico.

In questa situazione l'acciaio risulta impermeabile all'ossigeno e all'umidità e la formazione di ruggine è impedita.

Quando, tuttavia, lo strato di copriferro che ricopre le barre risulta saturo di anidride carbonica proveniente dall'ambiente esterno, lo strato di ossido si rompe a causa della formazione di carbonato di calcio, il quale riduce il pH del materiale:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCo_3 + H_2O$$

Quando il pH risulta minore di 11, le armature risultano completamente depassivate e possono essere corrose a causa della presenza di ossigeno o umidità (Figura 9).



Figura 9: Esempio di corrosione post-carbonatazione

Il fenomeno risulta influenzato dallo spessore del copriferro e dal rapporto a/c (correlato alla porosità del calcestruzzo) in quanto la velocità di carbonatazione segue la legge:

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

dove x è lo spessore di calcestruzzo penetrato dalla CO<sub>2</sub> al tempo t e K è una costante correlata alla porosità del materiale e all'umidità ambientale (Figura 10).



Figura 10: Profondità del fronte carbonatato in funzione del tempo e di K

## 1.4.2 Pitting

L'anidride carbonica non è l'unica ad attivare il processo di depassivazione: essa infatti può avvenire anche attraverso l'azione del cloro contenuto nei sali disgelanti o in ambiente marino.

Similmente alla carbonatazione, il pitting permette l'inizio della corrosione da parte di ossigeno e acqua.

Le strutture in cui il fenomeno è maggiormente riscontrato sono di conseguenza quelle semiimmerse soggette al moto ondoso del mare (Figura 11), ovvero caratterizzate sia da periodi di bagnatura, in cui avviene l'azione del cloro, sia da periodi asciutti, in cui avviene l'azione dell'ossigeno dell'aria.



Figura 11: Corrosione da cloruri di elementi in calcestruzzo in condizioni semi-immerse

La penetrazione del cloruro attraverso il copriferro può avvenire attraverso due meccanismi:

• assorbimento per suzione capillare di acqua contente sali attraverso i pori capillari vuoti del calcestruzzo, regolato dalla seguente legge

$$P_c = \frac{2\gamma}{r}\cos\theta$$

dove  $P_c$  è la pressione capillare,  $\gamma$  è la tensione superficiale dell'acqua, r è il raggio del poro e  $\vartheta$  è l'angolo di bagnatura;

 diffusione del cloruro attraverso il calcestruzzo nei pori capillari saturi di acqua, caratterizzata da un gradiente di concentrazione δc/δt la cui espressione è data dalla seconda legge di Fick (Figura 12)

$$\frac{\delta c}{\delta t} = D \frac{\delta^2 c}{\delta^2 x}$$

dove D è il coefficiente di diffusione, il quale dipende dal rapporto a/c, dal tempo di stagionatura e dal tipo di cemento.

La soluzione di quest'ultima, ottenuta considerando una concentrazione di cloruri  $c_s$  costante, caratteristiche porosimetriche costanti e un calcestruzzo in cui la concentrazione risulti nulla sulla faccia opposta alla sorgente di cloruro (struttura semi-infinita), risulta la seguente:

$$c/c_s = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

L'equazione suppone quindi che la concentrazione di cloruri diminuisca, dopo un certo intervallo di tempo t e in funzione dello spessore di calcestruzzo x, dal valore superficiale  $c_s$  (Figura 12).



Figura 12: Profili di diffusione dei cloruri nel calcestruzzo in funzione del tempo e al variare del coefficiente di diffusione D

Il coefficiente *D* risulta in correlazione con il *K* introdotto nella carbonatazione attraverso la legge:

$$D = \frac{K^2}{16}$$

## 1.5 Degrado da attacco solfatico

L'attacco solfatico (Figura 13) consiste nell'interazione tra lo ione SO<sub>4</sub><sup>--</sup>, presente all'interno del calcestruzzo o proveniente dall'esterno, e i composti Ca(OH)<sub>2</sub>, C-S-H e C-A-H.



Figura 13: Effetti della corrosione sulle pareti di un canale in calcestruzzo [1]

A seconda della provenienza degli ioni solfato, si distinguono due fenomeni: ESA e ISA.

Esiste inoltre un terzo fenomeno che coinvolge una particolare forma di silice e denominato ASR.

#### 1.5.1 External Sulphate Attack (ESA)

I solfati possono essere presenti nei terreni e nelle acque a contatto delle strutture in calcestruzzo e penetrare all'interno del materiale attraverso il trasporto da parte dell'acqua in cui sono disciolti.

Successivamente all'ingresso degli ioni, possono avvenire diversi fenomeni:

• la decalcificazione, cioè la trasformazione della calce presente in gesso di volume maggiore, con successivo rigonfiamento e delaminazione superficiale;

$$Ca(OH)_{2} \xrightarrow{SO_{4}^{--}} CaSO_{4} * 2H_{2}O + 2OH^{-}$$
$$H_{2}O$$

• la trasformazione del composto C-S-H, responsabile delle prestazioni meccaniche del calcestruzzo, in ulteriore gesso e in silice idrata S-H, priva di capacità legante;

$$C - S - H \xrightarrow{SO_4^{--}} CaSO_4 * 2H_2O + SH_{H_2O}$$

 la reazione del gesso precedentemente prodotto con gli alluminati idrati C-A-H, che produce ettringite secondaria (Figura 14) e determina la nascita di rigonfiamenti, delaminazioni, fessurazioni e distacchi;





Figura 14: esempio di comparsa di ettringite secondaria nei vuoti attorno alle particelle di aggregato [33]

 la formazione, a temperature inferiori a 10°C con un'umidità relativa UR>95% ed in presenza di CaCO<sub>3</sub> disperso nella pasta cementizia, di thaumasite, con effetti gravi sul materiale a causa della contemporanea decalcificazione e perdita di C-S-H (Figura 15).

$$CaSO_{4} * 2H_{2}O + H_{2}O$$

$$C - S - H - - - - - - - - - CaSio_{3} * CaSO_{4} * CaCO_{3} * 15H_{2}O$$

$$CaCO_{3}$$



Figura 15: Differenza tra un provino integro immerso in acqua (a sinistra), in acqua solfatica con formazione di ettringite (al centro), in acqua solfatica con formazione di thaumasite (a destra) [1]

La distinzione tra ettringite primaria (Early Ettringite Formation o EEF) e secondaria (Delayed Ettringite Formation o DEF) è dovuta principalmente al fatto che la prima è dovuta alla reazione con alluminati anidri quali C<sub>3</sub>A e C<sub>4</sub>AF e non provoca alcun danno in quanto si forma omogeneamente durante la fase di presa, quando il calcestruzzo è ancora plastico; la seconda, invece, si forma eterogeneamente, principalmente nella parte corticale della struttura, a calcestruzzo indurito e genera tensioni elevate.

#### 1.5.2 Internal Sulphate Attack (ISA)

L'attacco solfatico interno è dovuto a impurezze del materiale o all'utilizzo di gesso per regolare la presa nel cemento.

La reazione, anche in questo caso, è ritardata a causa delle grandi particelle, lentamente solubili, all'interno delle quali si trovano gli ioni solfato, provocando così formazione di ettringite secondaria.

Esiste un ulteriore attacco, classificato come DEF ma in realtà di tipo ISA, all'interno delle strutture in c.a.p: quello dovuto alla decomposizione di ettringite primaria durante la maturazione del calcestruzzo a temperature superiori ai 90°C.

Durante tale processo, si formano gesso, alluminati e idrati, i quali si depositano all'interno di microfessurazioni interne dovute alla coazione da precompressione e si trasformano successivamente e nuovamente in ettringite a calcestruzzo ormai indurito; tale fenomeno può essere disastroso se la struttura risulta esposta alla pioggia.

#### 1.5.3 Alkali-Silica Reaction (ASR)

La reazione alcali-silice avviene in presenza di silice mal cristallizzata o amorfa S\* capace di reagire, in presenza di acqua, con alcali del cemento quali sodio e potassio per produrre silicati di sodio e potassio idrati molto voluminosi.

$$Na^+, K^+$$
  

$$S^* - - \rightarrow N - S - H + K - S - H$$
  

$$H_2O$$

La soglia critica nel contenuto di alcali che determina l'innesco di ASR è pari a 2 kg di  $Na_2O$  equivalente ( $Na_2O + 0,67K_2O$ ).

Questo processo risulta presente in cementi ricchi in alcali e in cui non siano stati inseriti materiali come pozzolana o loppa in modo da rendere la reazione uniforme, in strutture in cui è stato applicato uno spolvero indurente ricco di cemento, in pavimenti soggetti a carichi dinamici.

Il degrado, in questo caso, si manifesta in diversi modi:

 tramite microfessurazione diffusa a ragnatela e con raccolta di materiale biancastro (Figura 16);



Figura 16: Microfessurazione a ragnatela dovuta ad ASR

- attraverso il sollevamento di conetti di calcestruzzo al di sopra dell'aggregato reattivo (pop-out);
- mediante una macrofessurazione irregolare (Figura 17).



Figura 17: Macrofessurazione irregolare da ASR

# 1.6 Formazione di ghiaccio

L'acqua che penetra attraverso la porosità del calcestruzzo può rappresentare un problema ulteriore nel caso la temperatura scenda al di sotto dei 0°C: l'aumento del 9% in volume durante la trasformazione in ghiaccio comporta infatti la nascita di tensioni che possono portare il materiale a rompersi.

Per questo motivo, la saturazione critica risulta pari al 9%; tuttavia, questa non fa riferimento all'intero volume di calcestruzzo, ma è da considerare localmente in quanto la distribuzione dell'acqua è disuniforme.

Le strutture non soggette a rottura possiedono le seguenti caratteristiche:

- ridotta microporosità (0,1 10 μm), dovuta ad un rapporto a/c basso e in grado di ostacolare l'ingresso di pioggia e diminuire l'acqua di impasto, la quale può rimanere all'interno del calcestruzzo se presente in quantità eccessiva;
- pori di grande dimensione (100 300 μm), aventi spacing dell'ordine di qualche centinaio di μm e prodotti da agenti aeranti che permettono la presenza di bolle d'aria inglobate nella pasta cementizia in modo da favorire il movimento dell'acqua non ancora congelata durante la formazione di ghiaccio (Figura 18);



Figura 18: Influenza dello spacing tra le bolle d'aria sulla durabilità di una struttura in calcestruzzo [1]

#### 3. aggregato lapideo non gelivo.

In assenza di queste caratteristiche, la parte superficiale della struttura può fessurarsi e rompersi, con conseguente espulsione del copriferro e aumento del degrado (Figura 19).



Figura 19: Effetti del degrado dovuto alla formazione di ghiaccio [34] [35]

# 1.7 Il degrado nei ponti

I ponti sono opere altamente vulnerabili e soggette ad ammaloramento: ad esempio il Dipartimento dei Trasporti Americano ha dichiarato che oltre il 40% dei ponti presenti negli Stati Uniti può essere considerato a rischio.

Una delle cause principali va ricercata nell'aumento di sollecitazioni a cui sono sottoposti e per cui non sono stati progettati: l'ISTAT ha rilevato che "dal 1950 al 2015 il traffico di autocarri circolanti annualmente in Italia sia aumentato da 200.000 a 4.600.000 veicoli, pari ad un incremento del 2300%" [21].

Questo comporta sicuramente anche un notevole incremento delle condizioni di fatica dei manufatti tali da compromettere, con l'aiuto degli agenti aggressivi, la loro staticità.

Un altro fenomeno che può compromettere quest'ultima è l'infragilimento da idrogeno nei trefoli precompressi: l'acciaio ottenuto per lavorazione a caldo seguita da deformazione a freddo e distensione può essere soggetto nel tempo ad una concentrazione di ioni idrogeno che comporta un infragilimento del materiale e la nascita di cricche, le quali possono produrre rotture di schianto (Figura 20).



Figura 20: Sezione di un trefolo soggetto a rottura fragile ed effetti sulle strutture precompresse

Unitamente a quanto precedentemente esposto, esistono molti errori di progettazione e costruzione che sono causa di ammaloramenti.

Tra questi è possibile elencare:

l'errata disposizione delle armature all'interno delle sezioni (Figura 21), in quanto si è evidenziato come le barre posizionate all'interno di spigoli abbiano una vita utile pari al 50% di quella prevista e che le barre troppo ravvicinate possano permettere la formazione di vespai nascosti nel calcestruzzo;



Figura 21: Errori costruttivi nella disposizione delle armature [31]

 la mancata predisposizione di protezioni delle armature dagli effetti dell'acqua di percolazione, come la rimozione degli angoli vivi delle sezioni, e da quella proiettata dai veicoli in transito (Figura 22);



*Figura 22: Errori costruttivi nella protezione del calcestruzzo* [31]

- la presenza di giunti di dilatazione non congrui;
- una impermeabilizzazione assente o inadeguata;
- una scarsa o inadeguata canalizzazione delle acque meteoriche (Figura 23);



Figura 23: Errori costruttivi nella canalizzazione delle acque in opere in calcestruzzo [31]

 un riempimento incompleto delle guaine di alloggiamento dei trefoli di strutture posttese a causa della sedimentazione del cemento appartenente a boiacche troppo fluide, con conseguente evaporazione dell'acqua di impasto e una maggiore esposizione agli agenti corrosivi (bleeding, Figura 24).



Figura 24: Accumulo di acqua attorno alle armature a causa del bleeding del calcestruzzo [1]

# Capitolo 2 – Effetti del degrado

La propagazione della corrosione comporta diversi effetti sulle strutture, tra cui:

- riduzione della sezione delle barre d'armatura;
- riduzione della duttilità e comparsa di meccanismi fragili;
- concentrazione di sforzi dovuta all'aumento di volume dell'acciaio corroso;
- alterazione del legame di aderenza tra calcestruzzo e componente metallica.

I fenomeni suddetti modificano di conseguenza i legami costitutivi dei materiali e vengono tenuti in conto attraverso opportuni modelli.

#### 2.1 Modifica del legame costitutivo dell'acciaio

L'acciaio corroso manifesta un'alterazione delle sue caratteristiche che comporta la modifica delle sue leggi costitutive e un passaggio da un comportamento duttile ad uno fragile (Figura 25).



Figura 25: Perdita di duttilità al variare della percentuale di corrosione (da Almusallam [29])

La variazione delle caratteristiche dell'armatura è correlata alla posizione e all'apertura delle fessure nel calcestruzzo, nonché dalle caratteristiche geometriche e meccaniche della sezione.

Per poter stimare la diminuzione di resistenza dell'acciaio, è dapprima necessario stimare la perdita di sezione in funzione della penetrazione della corrosione.

In accordo con Rodriguez et al. [25], tale riduzione risulta esprimibile dalla seguente espressione:

#### $\phi = \phi_0 - \alpha x$

dove  $\emptyset$  è il diametro della barra corrosa,  $\emptyset_0$  è il diametro iniziale della barra,  $\alpha$  è un coefficiente che vale 2 in presenza di corrosione uniforme e aumenta fino ad un massimo di 10 per corrosione localizzata, *x* è la penetrazione della corrosione (Figura 26).



Figura 26: Schematizzazione della perdita di sezione di una barra a causa della corrosione [25]

È altresì fornita, da parte di Alonso et al. [24], una relazione tra l'ampiezza della fessura  $w_c$  e la profondità di corrosione *x* (Figura 27):

$$w_c = 0.05 + \beta \cdot [\mathbf{x} - \mathbf{x}_0]$$

dove  $w_c$  è espresso in mm,  $\beta$  è un coefficiente che assume il valore 0.01 per le barre appartenenti all'armatura superiore e 0.0125 per quelle dell'armatura inferiore,  $x_0$  corrisponde alla penetrazione all'inizio del cracking (µm).



Figura 27: Andamento della profondità di penetrazione ad inizio cracking al variare del rapporto tra il copriferro e il diametro delle barre (da Alonso et al. [24])

La profondità  $x_0$  è espressa dalla seguente equazione [24]:

$$x_0 = 7.53 + 9.52 \cdot \frac{c}{\varphi_0} \qquad \qquad \text{Alonso et Al.}$$

dove  $\frac{c}{\sigma_0}$  è il rapporto copriferro/diametro della barra iniziale e  $f_{ct}$  è la resistenza a trazione del calcestruzzo (Mpa).

Infine, è stata trovata, da parte di Vidal et al. [26], una correlazione tra l'apertura delle fessure, la profondità di pitting e la riduzione di sezione dell'armatura (Figura 28):

$$x_{pit} = \frac{\emptyset_0}{c} \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{\Delta A_s}{A_s}} \right] \cdot 10^3$$
$$w_c = 0.0575(\Delta A_s - \Delta A_{s0})$$

dove

-  $\Delta A_s$  è la perdita di area dovuta alla corrosion, definita come:

$$\Delta A_s = \frac{\pi}{4} \cdot (2 \cdot c \cdot x \cdot \phi_0 - c^2 \cdot x_{pit}^2)$$

-  $\Delta A_{s0}$  è la perdita di area in corrispondenza dell'apice della fessura più esterna e la cui formulazione è di seguito espressa:

$$\Delta A_{s0} = A_s \left\{ 1 - \left[ 1 - \frac{\alpha}{\phi_0} \left( 7.53 + 9.32 \frac{c}{\phi} \right) 10^3 \right]^2 \right\}$$



Figura 28: Valori di apertura di una fessura al variare della perdita di area (da Vidal et

al. [26])

Le espressioni precedentemente fornite presentano, tuttavia, due problematiche: la validità per diverse condizioni di corrosione e per fessure con grande apertura.

Esse infatti sono state determinate grazie a test a corrosione naturale o con una corrosione ottenuta con una densità di corrente limitata ( $200 \,\mu\text{A/cm}^2$ ); inoltre, non sono state tenute in conto fessure con ampiezza maggiore ai 2 mm in quanto, oltre questo limite, può avvenire delaminazione e la deviazione dei risultati ottenuta includendo misure così alte risulta altresì elevata, rendendo l'interpretazione statistica non affidabile.

Inoltre è noto che:

- barre a grande diametro producono fessure più ampie di una a diametro inferiore, a parità di copriferro;
- i calcestruzzi dotati di alta resistenza a trazione possiedono la capacità di eliminare o contenere la fessurazione dovuta all'espansione degli ossidi.

Di conseguenza è stato introdotto, grazie ad Andrade et Al. [28], un nuovo parametro CT:

$$CT = \left(\alpha \frac{c}{\omega}\right)^{-\frac{\beta}{f_{ct}}}$$

dove, al di fuori dei parametri già introdotti, compare un coefficiente adimensionale  $\alpha$ , pari a 0.63, e un coefficiente  $\theta$ , pari a 1.41 MPa.

Questo parametro è utilizzato per ricavare l'ampiezza massima di una fessura ed è stato introdotto all'interno di una curva di interpolazione la cui equazione è la seguente [28]:

$$w_{max} = 15.863 \left(\frac{x_{ave}}{R_0} \cdot CT\right)^{0.928}$$

dove  $x_{ave}$  è la penetrazione media della corrosione e  $R_0$  è il raggio della barra non corrosa.

Una volta nota la perdita di sezione in acciaio, è possibile calcolare le nuove caratteristiche meccaniche attraverso la formulazione proposta da Cairns [23]:

$$f_y = (1 - \alpha_y \cdot Q_{corr}) \cdot f_{y0}$$
$$f_u = (1 - \alpha_u \cdot Q_{corr}) \cdot f_{u0}$$
$$\varepsilon_u = (1 - \alpha_1 \cdot Q_{corr}) \cdot \varepsilon_{u0}$$

dove  $f_{y0}$ ,  $f_{u0}$  e  $\varepsilon_{u0}$  sono rispettivamente la resistenza a trazione, la resistenza a rottura e la deformazione ultima dell'acciaio allo stato non corroso.
I valori dei coefficienti  $\alpha$  dipendono dalla perdita media della sezione trasversale  $Q_{corr}$  e sono evidenziati in Tabella 3:

Corrosione	<b>Q</b> <sub>corr</sub> [%]	$\alpha_y$	$\alpha_u$	α <sub>1</sub>
Cloruri	0 ÷ 25	0.017	0.018	0.06
Carbonatazione	0 ÷ 3	0.012	0.011	0.03

Tabella 3: Valori dei coefficienti α in funzione della perdita di sezione (in percentuale)

Infine, la perdita di duttilità delle barre è esprimibile da Kobayashi (2006):

$$\frac{\varepsilon'_u}{\varepsilon_u} = 100 - 18.1x$$

#### 2.2 Modifica del legame costitutivo del calcestruzzo

Il degrado e quindi la fessurazione del calcestruzzo deve essere tenuta in conto anche prima del distacco e quindi prima della riduzione della sezione resistente.

La fessurazione longitudinale infatti danneggia le proprietà del calcestruzzo riducendo la resistenza a compressione del calcestruzzo fessurato. La resistenza a compressione ridotta del calcestruzzo si può calcolare attraverso la formulazione proposta da Coronelli et al. [22]:

$$f_{c,rid} = \frac{f_c}{1 + k\varepsilon_t/\varepsilon_{c0}}$$

in cui:

- k è un coefficiente legato alla scabrezza e al diametro delle barre;
- *f<sub>c</sub>* è il valore di picco della tensione di compressione a cui corrisponde la deformazione
  ε<sub>c0</sub>;
- la deformazione  $\varepsilon_{c0}$  risulta pari a

$$\varepsilon_{c0} = 0.0017 + 0.0010 \cdot \frac{f_{cm}}{70}$$

-  $\varepsilon_t$  rappresenta la deformazione trasversale di rigonfiamento della sezione e si può calcolare come:

$$\varepsilon_t = \frac{b_f - b_i}{b_i}$$

in cui  $b_i$ è la larghezza della parte di sezione considerata,  $b_f$  è la dimensione raggiunta in seguito all'apertura delle fessure.

Indicando con w l'apertura media di fessura per ogni barra si può scrivere:

$$b_f - b_i = n_{barre} \cdot w$$

Così facendo, la deformazione trasversale risulta:

$$\varepsilon_t = \frac{n_{barre} \cdot w}{b_i}$$

Secondo l'approccio seguito in DuraCrete (1998) *w* può essere stimato, ipotizzando una corrosione di tipo uniforme della barra, come:

$$w_t = \begin{cases} 0 & se \quad x \le x_0 \\ w_0 + \beta \cdot (x - x_0) & se \quad x > x_0 \end{cases}$$

in cui

- $w_0 = 0.05 mm$  rappresenta l'apertura di una fessurazione intrinseca;
- $\beta$  è un parametro costante assunto pari a 0.009 mm/µm;
- *x* è la profondità della corrosione;
- *x*<sub>0</sub> rappresenta la profondità di corrosione necessaria per produrre la prima fessura, definita da Rodriguez et al. [25]:

$$x_0 = a_1 + a_2 \cdot \frac{c}{D_0} + a_3 \cdot f_{c,sp}$$

in cui *c* è lo spessore del copriferro,  $D_0$  è il diametro della barra più grande nel gruppo considerato, i parametri  $a_1 = 74.4 \mu m$ ,  $a_2 = 7.3 \mu m$ ,  $a_3 = -\frac{17.4 \mu m}{mm^2}/N$  sono ottenuti per via sperimentale,  $f_{c,sp}$  è la resistenza caratteristica di trazione allo splitting, valutabile come:

$$f_{c,sp} = \frac{f_{ct,095}}{0.9}$$

#### 2.3 Modifica del legame di aderenza acciaio-calcestruzzo

La collaborazione tra il calcestruzzo e l'armatura in esso contenuta è realizzata attraverso tensioni di aderenza che, per le barre lisce, si sviluppano solo grazie all'azione chimica e all'attrito, mentre per le barre odierne è garantita dalla presenza di nervature.

In presenza di corrosione, l'aderenza aumenta inizialmente grazie all'espansione degli ossidi dell'acciaio, ma diminuisce progressivamente in seguito a causa della riduzione delle nervature e della fessurazione del copriferro (Figura 29), fino a determinare un collasso improvviso se la barra risulta libera di scorrere (splitting failure) o una rottura del legame per effetto del tranciamento del calcestruzzo compreso tra due nervature.



Figura 29: Variazione del legame di aderenza in funzione della percentuale di corrosione [22]

L'andamento delle tensioni di aderenza al variare del livello di corrosione è fornita dalla formulazione fornita da Cabrera [30]:

$$\tau_{bu} = 23.478 - 1.313 X_p$$

in cui  $X_p$  rappresenta il livello di corrosione espresso come perdita di massa in %.

# Capitolo 3 – Valutazione dello stato di danno e diagnosi del degrado

La valutazione dello stato di fatto delle opere è fondamentale per la determinazione della durabilità delle stesse e degli interventi da adottare per garantirne la messa in sicurezza.

La prima parte della valutazione consiste nelle ispezioni, che permettono di avere un censimento dell'opera e l'individuazione visiva della localizzazione dei danni presenti.

La seconda parte, invece, consiste in una serie di prove atte a stabilire la posizione e l'entità del danno, nonché le caratteristiche meccaniche attuali dei materiali costituenti.

In alcune strutture particolarmente ammalorate e in infrastrutture quali ponti e viadotti, l'adozione di prove distruttive risulta impossibile e l'individuazione del danno risulta difficoltosa in quanto strutture composite di difficile accesso; di conseguenza, è possibile ricorrere ad una serie di prove non distruttive che forniscono dati utili per la stima dell'ammaloramento e la calibrazione di eventuali prove distruttive da eseguire successivamente.

# 3.1 Ispezioni

Le ispezioni permettono il raccoglimento di dati utili per la conoscenza del manufatto, la valutazione dell'ammaloramento e l'orientamento delle prove da eseguire.

Sono condotte attraverso l'utilizzo di strumentazioni quali: macchina fotografica, binocolo, metri rigidi e flessibili, lente di ingradimento, martelletto e corda, bolla e squadretta, fessurimetro, calibro.

Le informazioni ricavabili da un'ispezione sono:

- la tipologia di struttura e il relativo schema statico;
- le caratteristiche geometriche;
- le caratteristiche costruttive quali presenza e tipologia di elementi non strutturali, tipologia di materiali costituenti l'opera, presenza di dettagli come scarichi, giunti e impermeabilizzazioni;
- tipologia di degrado presente.

Per la valutazione dello stato dei ponti, l'ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003 ha previsto l'adozione di un manuale che permette delle "verifiche di livello 0" o "primarie", il cui utilizzo è di seguito illustrato.

# 3.1.1 Scheda di valutazione ispettiva e metodo della valutazione numerica del danno (MVN)

Il MVN è utilizzato per dare una indicazione numerica dei danni rilevati durante l'ispezione primaria dei ponti in Italia.

Esso fornisce due indicatori: D<sub>R</sub> e D<sub>A</sub>.

La difettosità relativa fornisce lo stato di degrado del singolo elemento strutturale ed è così definita:

$$D_R = \sum (G * K_1 * K_2)$$

La difettosità assoluta, invece, rappresenta l'indice complessivo del degrado ed indica, attraverso la sua grandezza, la dimensione dell'onere economico che si dovrà affrontare per un risanamento; la sua espressione è la seguente:

$$D_A = \sum (G * K_1 * K_2 * N)$$

Le difettosità dipendono quindi da:

- il peso *G* dei singoli difetti, variabile da 1 a 5 a seconda se:
  - a. costituisca un pericolo (rischio attuale, G=5);
  - b. possa ridurre le capacità portanti (rischio potenziale, G=5);
  - c. costituisca un innesco di altri difetti (rischio indotto);
  - d. comporti un alto onere economico per il ripristino (rischio economico).
- il coefficiente di estensione *K*<sub>1</sub>, che può assumere i valori 0,2-0,5-1,0 a seconda se:
  - a. il difetto analizzato sia "presente", ma interessi solo una parte minima della zona o quantità di pertinenza;
  - b. il difetto interessi tra il 30 ed il 70% della zona o quantità di pertinenza;
  - c. il difetto interessi l'intera zona o quantità di pertinenza.
- il coefficiente di intensità K<sub>2</sub>, che può altresì assumere i valori 0,2-0,5-1,0 in funzione della gravità del difetto;
- il numero di difetti rilevati N.

I valori relativi ai singoli pesi e ai coefficienti vengono riportati in una serie di schede di valutazione ispettiva contenute all'interno del "Manuale di valutazione dello stato dei ponti".

Le schede possono essere di 18 tipi a seconda dell'elemento strutturale e del materiale costituente e riportano tutti i difetti riscontrati sull'elemento strutturale con la relativa percentuale di "Completamento", ovvero la quantità di difetti controllati rispetto alla loro potenziale totalità.

	Scheda Ispezione Ponti										
3	3 Pile			N° Posizione			_ P	osizione	Materiale: calcestruzzo		
Struttura: Località: km: Ispettore:							Ispettore: data://				
N° Decerizione difette	40	G	Estensione K		ie Ki	Intensità K <sub>2</sub>		K <sub>2</sub>	N°	Note	
N	Descrizione diretto	vis	0	0,2	0,5	1	0,2	0,5	1	Foto	Note
1.1)	Macchie di umidità passiva		1								
1.2)	Macchie di umidità attiva		4								
1.3)	Cis dilavato / ammalorato		2								
1.4)	Vespai		2								
1.5)	Distacco del copriferro		2								
1.6)	Armatura ossidata		5								
1.13)	Lesioni a ragnatela modeste		1								
1.14)	Fessure orizzontali		2	17	1+3	- 3					
1.15)	Fessure verticali		2	+1	1+3	*3					
1.16)	Fessure diagonali		5		7+3	×1					
1.20)	Staffe scoperte / ossidate		3								
1.21)	Lesioni attacco pilastri		2								
1.23)	Armatura verticale deformata		5								
1.25)	Riprese successive deteriorate		1								
1.29)	Danni da urto		4								
1.30)	Danni causati dagli app. d'appog.		4								
5.1)	Fuori piombo		5					4 - FR	10		
5.2)	Scalzamento		5								
5.5)	Difetti d'appoggio in neoprene		4								
5.6)	Difetti pendoli		4								
5.7)	Difetti carrelli		4								
5.8)	Difetti d'appoggio compositi		4								

In Figura 30 si mostra una scheda tipo:

Figura 30: Scheda di valutazione ispettiva per la valutazione del degrado dei ponti

## 3.2 Tecniche diagnostiche dell'ammaloramento – prove non distruttive

Le prove non distruttive fanno parte di una serie di prove atte a raccogliere dati sperimentali utili per stabilire le cause del degrado di una struttura e dei materiali che la costituiscono.

Esse consistono in test di carattere fisico o fisico-meccanico da eseguire in sito senza danneggiare o alterare l'estetica della struttura.

In genere, è molto difficile che con le sole prove non distruttive si possa arrivare ad una diagnosi corretta del degrado di una struttura, tuttavia il loro utilizzo risulta complementare a quello delle prove distruttive: possono essere infatti utilizzate come guida per la scelta dei punti di prelievo dei provini (campionamento) e l'accoppiamento con analisi di laboratorio permette di ridurre il numero totale di prove da eseguire, fornendo comunque una caratterizzazione completa.

A questo tipo di prove precede generalmente la redazione di una documentazione fotografica, la quale fornisce una visione d'insieme della struttura oggetto di studio unitamente a foto di dettaglio correttamente codificate.

Le prove non distruttive attualmente esistenti sono le seguenti:

- termografia;
- endoscopia;
- misure di depassivazione;
- magnetometria (o indagine pacometrica);
- misura del potenziale di corrosione;
- gammagrafia;
- auscultazione sonica;
- rilevamento di ultrasuoni;
- sclerometria;
- metodo Son-Reb;
- impact echo;
- ground penetrating radar;
- acoustic emissions;
- analisi modale sperimentale.

Ad esse possono venire affiancate anche prove semi-distruttive quali pull-out e pull-off, le quali provocano un danno trascurabile e facilmente riparabile sulla superficie della struttura.

## 3.2.1 Termografia

La termografia sfrutta la differenza di calore specifico e conducibilità termica dei materiali costituenti la struttura indagata per poter individuare le varie parti che la costituiscono e l'eventuale presenza di zone di umidità.

Infatti, diversi elementi esposti alle stesse condizioni termiche si portano ad una diversa temperatura in funzione delle loro proprietà termiche ed emettono un flusso di energia E definito dalla legge di Stefan-Bolzmann:

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

dove

- T è la temperatura assoluta in gradi Kelvin della superficie da cui proviene il flusso;
- $\sigma$  è una costante che vale 5,67 \* 10<sup>-8</sup>  $\frac{W}{m^{2*}K^4}$ ;
- $\varepsilon$  è detta "emissività" ed è una costante del materiale.

Di conseguenza, attraverso l'analisi delle onde infrarosse generate dalle superfici indagate, è possibile riprodurre un'immagine in falsi colori che evidenzia la distribuzione di temperatura all'interno di una struttura (Figura 31).



Figura 31: Esempio di una scansione termografica di un edificio [36]

La strumentazione adottata per questa prova consta di:

- un rilevatore di radiazioni infrarosse con lunghezza d'onda compresa tra i 2 e i 6 millimetri;
- un sistema ottico costituito da numerose lenti;
- un sistema elettrico atto a trasformare in segnale elettrico l'intensità della radiazione assorbita dalle lenti;

- un termogramma, che registra graficamente le diverse temperature attraverso tonalità monocromatiche proporzionali al flusso di energia E.

# 3.2.2 Endoscopia

L'endoscopia, sebbene non sia propriamente una prova non distruttiva, viene classificata come tale in quanto abbinata a prove come l'indagine termografica per indagini in sito.

Essa permette l'osservazione diretta delle superfici interne della struttura attraverso fori, di diametro variabile dai pochi millimetri a pochi centimetri, attraverso cui viene fatto passare un sistema ottico costituito da fibre ottiche, un sistema di illuminazione interna ed un oculare esterno abbinato ad una camera fotografica per registrare le osservazioni.

# 3.2.3 Misure di depassivazione

La profondità di calcestruzzo carbonatato "x" viene determinata attraverso l'applicazione di fenolftaleina all'1% in alcol etilico: la soluzione rimane di colore rosso nelle zone a pH  $\geq$  11, mentre si colora di grigio nelle zone in cui il pH risulta inferiore a 11 e quindi soggette a carbonatazione (Figura 32).

La profondità di penetrazione degli ioni cloruro può essere invece determinata utilizzando un indicatore a base di fluoresceina e nitrato di argento, il quale sviluppa un colore nero nella zona non penetrata ed un colore chiaro di tonalità rosa in quella in cui è presente il cloruro (Figura 32).



Figura 32: Prove di carbonatazione [37] e di penetrazione ioni cloruro [1] su provini in calcestruzzo

Le due soluzioni possono essere utilizzate direttamente sulla struttura per determinare lo spessore di calcestruzzo da rimuovere e sostituire con nuova malta, oppure vengono utilizzate su provini della struttura prelevati attraverso carotaggio: in questo caso, la profondità x viene calcolata come la media delle profondità rilevate sulle quattro facce del singolo provino.

#### 3.2.4 Magnetometria

L'indagine pacometrica si basa sul principio dell'induzione magnetica: se un conduttore elettrico di lunghezza l si muove con velocità v attraverso un campo magnetico di intensità B, all'estremità del conduttore si genera una differenza di potenziale e definita come:

$$e = B * l * v$$

Se il conduttore è collegato ad un circuito stazionario rispetto al campo magnetico, la tensione indotta causa il passaggio di una corrente di intensità i, la quale determina una caduta di potenziale iR, dove R è la resistenza elettrica del conduttore. La differenza di potenziale V di conseguenza vale:

$$V = e - i * R$$

In questo caso, il campo magnetico *e* è alternato e viene emesso da una sonda costituita da una bobina attraversata da una corrente alternata di frequenza costante, mentre il conduttore che altera il voltaggio è rappresentato dall'armatura presente all'interno della struttura, la quale determina una caduta proporzionale al suo spessore e allo spessore del materiale che la ricopre: di conseguenza, è possibile, previa taratura dello strumento, determinare il diametro delle barre e il valore del copriferro.

Per poter registrare l'andamento delle variazioni del potenziale, il pacometro è dotato di un'unita di elaborazione digitale che effettua la lettura del campo elettromagnetico e la riporta graficamente.

#### 3.2.5 Misura del potenziale di corrosione

Il suddetto metodo misura, attraverso elettrodi al Cu/CuSO4 (CSE) collegati ad un voltmetro ad alta impedenza, il potenziale spontaneo dei ferri di armatura, ovvero il potenziale associato al campo elettrico che si genera durante la corrosione.

La misurazione viene effettuata posizionando uno o più elettrodi sulla superficie del calcestruzzo e un altro connesso fisicamente alle barre da indagare o a una barra esposta se metallicamente connessa con le altre (resistenza <  $0,3\Omega$ ).

Per individuare le zone di corrosione, la norma ASTM C 876-91 prevede una probabilità di corrosione trascurabile per E>-200mV e una probabilità molto elevata per E<-350 mV (Figura 33).



Figura 33: Indicazioni della norma ASTM C 876-91 per l'identificazione del livello di corrosione [5] [32]

I risultati di questa prova permettono una mappatura del potenziale di corrosione dell'elemento strutturale attraverso una scala cromatica (Figura 34).



Figura 34: Mappatura del potenziale all'interno di una trave in calcestruzzo

## 3.2.6 Gammagrafia

La gammagrafia utilizza sorgenti radioattive in grado di produrre raggi X per rilevare, su una pellicola e in diverse tonalità di grigio, le differenti caratteristiche di opacità e trasparenza del manufatto alle radiazioni, le quali variano in funzione della presenza di elementi metallici, fessure, cavità ecc.

A causa del pericolo nei confronti della sicurezza delle persone presenti nell'area di prova, questo tipo di indagine richiede una specifica autorizzazione.

#### 3.2.7 Auscultazione sonica

Questa tecnica, capace di rilevare all'interno di un manufatto la presenza di discontinuità quali fessure e cavità, sfrutta la capacità che queste ultime hanno di riflettere e rifrangere le onde soniche di frequenza compresa tra i 16 e i 20 kHz.

Per poter effettuare la prova, una sorgente di onde (martello o generatore di rumore) genera delle onde sulla struttura oggetto di studio e innesca un contatore, il quale determina il tempo t impiegato dalle onde per ritornare indietro fino al sensore, che le tramuta in segnale elettrico e interrompe il contatore.

La velocità V delle onde è definita dalla seguente legge:

$$V = \begin{bmatrix} \frac{E_d}{m_v} & \frac{1-v}{(1+v)(1-2v)} \end{bmatrix}$$

dove

- E<sub>d</sub> (N/mm<sup>2</sup>) è il modulo elastico dinamico del materiale attraversato dalle onde ultrasoniche;
- $m_v$  (kg/m<sup>3</sup>) è la massa volumica del materiale;
- v è il modulo di poisson del materiale.

Di conseguenza, conoscendo il tipo di materiale e sapendo anche che  $V = 2^{L_0}/t$  (dove V è la velocità attraverso il calcestruzzo integro), è possibile determinare la posizione  $L_0$  della fessura (Figura 35).



Figura 35: Rilevamento di una fessura in un palo di fondazione mediante auscultazione sonica [1]

La prova viene eseguita traslando sia il generatore sia il sensore lungo la struttura per individuare l'andamento delle discontinuità sull'intero sviluppo del manufatto.

## 3.2.8 Rilevamento degli ultrasuoni

Questo tipo di tecnica risulta analoga a quella sonica.

Tuttavia le onde ultrasoniche, aventi frequenza compresa tra i 40 e i 160 kHz e inudibili dall'uomo, sono più selettive di quelle soniche: esse infatti attraversano liquidi e solidi ma possiedono una scarsa abilità di trasmettersi attraverso l'aria, venendo per lo più riflesse.

La prova viene condotta grazie ad un generatore di onde con frequenza solitamente compresa tra i 50 e i 100 kHz, una sonda ricevente e un cronometro elettronico.

Questo tipo di prova, tuttavia, misura la velocità delle onde a percorrere un determinato cammino di spessore L noto ed evidenzia quindi variazioni di velocità senza individuare la posizione precisa delle discontinuità presenti nella struttura.

Le rilevazioni possono essere di tre tipi (Figura 36):

- a trasmissione diretta, quando il generatore ed il sensore sono sulle due facce opposte della struttura da indagare;
- a trasmissione indiretta, quando il generatore ed il sensore sono sulla stessa faccia della struttura; in questo caso non è noto il percorso delle onde e le misure vengono effettuate in maniera comparativa, spostando il ricevitore in posizioni equidistanti e verificando se la variazione di velocità risulta costante;
- a trasmissione semidiretta, quando il generatore ed il sensore sono posti su facce della struttura perpendicolari tra loro.



Figura 36: Tipologie di rilevamento di ultrasuoni

La prova ad ultrasuoni permette inoltre di correlare la velocità ultrasonica con la resistenza cubica del calcestruzzo attraverso delle curve (Figura 37) definite dalla seguente legge:

$$R_c = aV^b$$

dove a e b sono dei coefficienti ottenuti tramite calibrazione.



Figura 37: Curva velocità ultrasonica - resistenza a compressione [4]

Tuttavia, le relazioni che legano la velocità di propagazione alle caratteristiche meccaniche del mezzo dipendono dalle sue reali proprietà fisico-chimiche e i fattori che influenzano maggiormente le misurazioni sono:

- età del calcestruzzo (prova non adatta a calcestruzzi giovani);
- presenza di inerti grossolani, che aumenta la velocità di propagazione, a parità di resistenza;
- rapporto A/C, il quale può variare la resistenza del calcestruzzo ma non varia significativamente la velocità;
- stagionatura, la quale comporta la nascita di microfessurazioni che diminuiscono la velocità di propagazione delle onde;
- umidità, che aumenta i valori registrati fino al 5%;
- stato di sollecitazione del materiale, il quale può generare microfessurazioni;
- presenza di armature, al cui interno le onde si propagano anche fino al 40% più velocemente.

Di conseguenza, la prova ultrasonica da sola viene utilizzata per identificare lo stato fessurativo e valutare l'omogeneità del materiale.

## 3.2.9 Sclerometria

La sclerometria permette di determinare la durezza superficiale di una struttura attraverso la misurazione del livello di rimbalzo di una massa d'acciaio caricata da una molla di caratteristiche note e battente su un'asta di percussione a contatto con la superficie indagata (sclerometro Schmidt in Figura 38).



Figura 38: Sclerometro Schmidt [4]

In altre parole, la prova sfrutta il principio di conservazione dell'energia e calcola l'energia potenziale inizialmente posseduta dalla molla carica e quella della massa in acciaio attraverso la misurazione dell'altezza raggiunta dalla stessa successivamente all'impatto. In questo modo, è possibile ottenere per differenza l'energia persa durante l'impatto e di conseguenza la durezza superficiale del calcestruzzo.

Questo test permette inoltre di correlare la resistenza a compressione cubica del calcestruzzo  $R_c$  con l'indice sclerometrico *I* (direttamente proporzionale all'altezza di rimbalzo) attraverso una serie di curve fornite dallo strumento stesso, dipendenti dalla direzione di utilizzo ed espresse attraverso la seguente legge (Figura 39):

$$R_c = aI^b$$

dove a e b sono dei coefficienti ottenuti tramite calibrazione dello sclerometro.



Figura 39: Curva indice di rimbalzo-resistenza cubica a compressione [4]

Le misurazioni vengono effettuate su una superficie di circa 20x20 cm in maniera non sovrapposta su un numero minimo di punti pari a 9 (UNI 9189).

Tuttavia, la correlazione tra le due proprietà del materiale è influenzata da diversi fattori, quali:

- umidità del materiale, la quale diminuisce la resistenza a rottura;
- snellezza dell'elemento strutturale (è necessario che l'elemento sia spesso almeno 10 cm);
- carbonatazione del calcestruzzo, che determina l'indurimento dello strato superficiale e misurazioni di rigidezza maggiori, a parità di resistenza;
- durezza dell'aggregato lapideo o presenza di armature, che aumentano la rigidezza;
- stagionatura, che aumenta la resistenza a seguito dell'indurimento del calcestruzzo;
- zone che presentano difetti superficiali quali segregazione, eccessiva porosità ecc e diminuiscono i valori ottenuti dalle misurazioni.

Di conseguenza, la prova da sola viene impiegata tipicamente per verificare l'omogeneità del materiale e quindi individuare speditivamente e comparativamente zone di calcestruzzo relativamente più deboli e più forti in corrispondenza delle quali effettuare prelievi da poter successivamente utilizzare in prove distruttive.

#### 3.2.10 Metodo Son-Reb

Essendo il comportamento delle due prove opposto al variare di umidità ed età del calcestruzzo, il loro utilizzo combinato permette di compensare parzialmente gli errori di entrambe.

L'applicazione del metodo Sonreb richiede la valutazione dei valori locali della velocità ultrasonica V e dell'indice di rimbalzo I, a partire dai quali è possibile ottenere la resistenza del calcestruzzo R<sub>c</sub> mediante espressioni del tipo:

$$R_c = aV^b I^c$$

I coefficienti possono essere assunti da formule di letteratura o desunti attraverso calibrazione su carotaggi, se disponibili.

Nel primo caso, le espressioni fornite in bibliografia sono numerose; di seguito se ne mostrano alcune:

$R_c = 9,27 * 10^{-11} * V^{2,6} I^{1,4}$	(Norme RILEM)
$R_c = 1,2 * 10^{-9} * V^{2,446} I^{1,058}$	(Di Leo, Pascale, 1994)
$R_c = 4.4 * 10^{-7} * (V^3 I^2)^{0.5634}$	(Del Monte et al, 2004)
$R_c = 10^{-4,251} * V^{1,281} I^{0,686}$	(Cristofaro et al, 2009)
$R_c = 0,00004 * V^{1,88148} I^{0,8084}$	(Bufarini et al, 2010)
$R_c = 0,0286 * V^{1,85} I^{1,246}$	(Gasparik, 1984)
$R_c = 0,00153 * (V^4 I^3)^{0,611}$	(Arioglu et al, 1984)

È noto che la formula proposta da Di Leo, Pascale sia utilizzata per calcestruzzi ad alta resistenza in quanto utilizzata per stimare la classe di resistenza di travi in c.a.p. appartenenti ad un cavalcavia ferroviario.

Il calcolo può essere effettuato anche graficamente attraverso curve di isoresistenza all'interno di un piano V-I e dedotte dalle espressioni precedenti (Figura 40):



Figura 40: Curve di isoresistenza - Metodo SonReb [4]

Nel secondo caso, invece, la prova, che risulta fortemente influenzata e diversa in funzione del tipo di calcestruzzo, fornisce risultati precisi grazie ad un'analisi multi-regressiva, utilizzando come variabile dipendente la resistenza cubica e come variabili indipendenti i parametri I e V, usualmente adottando la funzione di potenza già descritta e una funzione lineare del tipo:

$$R_c = a + b * V + c * I$$

## 3.2.11 Impact Echo (IE)

Questa tipologia di prova permettere di determinare la presenza di difetti e vuoti all'interno del calcestruzzo e risulta molto vantaggiosa soprattutto nelle strutture post tese dove i trefoli sono alloggiati all'interno di guaine.

Il suo utilizzo prevede la perturbazione della struttura in oggetto attraverso una sferetta in acciaio e l'analisi, attraverso un trasduttore piezoelettrico, dell'onda elastica transiente generata, la quale risulta composta da tre componenti:

 onde P, associate alla propagazione degli sforzi in direzione normale e la cui velocità in un mezzo infinito e isotropo a comportamento elastico lineare è fornita dalla seguente espressione:

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} = \frac{V_{pp}}{\beta}$$

dove *E* è il modulo elastico,  $\rho$  è la densità del calcestruzzo, *v* è il modulo di Poisson,  $\beta$  è un coefficiente che dipende dal rapporto d'aspetto del solido in esame,  $V_p$  è la velocità effettiva delle onde mentre  $V_{pp}$  è la velocità generata dal moto vibrazionale della lastra, correlato allo spessore di quest'ultima;

- 2. onde S, associate alla propagazione degli sforzi in senso tangenziale (onde di taglio);
- onde R, che si disperdono in direzione ortogonale a quella di impatto e rappresentano un contributo rilevante del segnale in quanto generano spostamenti iniziali e periodici di grande ampiezza.

Le onde essenziali per la rilevazione del degrado sono le onde P, in quanto vengono riflesse dai difetti del materiale a causa della loro differente impedenza acustica.

Il segnale può essere analizzato attraverso l'utilizzo di un solo sensore o di due sensori: nel primo caso, essendo la velocità delle onde P nel mezzo sconosciute, risulta essenziale calibrare la prova su un tratto di spessore noto; nel secondo, invece, è possibile effettuare la misura della velocità in maniera diretta.

Il segnale viene rilevato nel dominio dal tempo ma successivamente analizzato nel dominio delle frequenze attraverso la Trasformata di Fourier (FFT).

La frequenza delle onde P, nota come "Plate Tickness Frequency", risulta pari a:

$$f_T = \frac{\beta V_p}{2T}$$

dove T è lo spessore del solido indagato.

La presenza di un difetto di lunghezza r viene evidenziata dalla presenza di due picchi di frequenza: uno relativo al modo di vibrare della sezione di spessore T, l'altro, meno ampio e a frequenze maggiori a causa della rigidezza inferiore in quel punto, relativo al difetto a distanza d (Figura 41).



Figura 41: Differenza nelle frequenze rilevate in calcestruzzo integro (a), in presenza di acciaio (b) e di difetti (c) [19]

È possibile quindi rilevare i difetti all'interno delle guaine attraverso le frequenze dei segnali riflessi da questi ultimi e dalle barre precompresse, rispettivamente pari a:

$$f_{void} = \frac{\beta V_p}{2d}$$
;  $f_{steel} = \frac{V_p}{4d}$ 

I risultati possono essere successivamente rappresentati all'interno di un impactechogramma (Figura 42), ovvero un diagramma 2D che riporta la posizione del punto di misura in ascissa, la frequenza in ordinata e l'energia associata alla frequenza nella terza dimensione.



Figura 42: Impactechogramma ottenuto dalla prova Impact Echo [6]

## 3.2.12 Ground Penetrating Radar (GPR)

Il GeoRadar è simile all'Impact Echo ma utilizza onde elettromagnetiche di frequenza compresa tra i 500 MHz e i 2,5 GHz ed emanate, attraverso l'ausilio di un'unità di controllo, da un'antenna posta sulla superficie del calcestruzzo.

Le onde emesse vengono in parte riflesse dai difetti del materiale e, misurando il ritardo impiegato per tornare al ricevitore, è possibile determinare la posizione dei target della suddetta prova.

L'antenna, dipolare in quanto funge anche da ricevitore, viene successivamente fatta scorrere, a velocità costante, lungo la superficie; il range di frequenze delle onde emesse risulta fondamentale: attraverso alte frequenze infatti è possibile cogliere difetti di piccole dimensioni, ma la profondità di struttura indagata risulta esigua.

La prova dipende da diversi parametri legati alla Teoria di Maxwell:

- conducibilità  $\sigma$  del materiale, in quanto materiali altamente conducibili quali l'acciaio determinano una forte attenuazione del segnale riflesso;
- costante dielettrica  $\varepsilon$  del materiale, che dipende dalle caratteristiche dei materiali appartenenti alla struttura, dal loro comportamento globale, da fattori ambientali e influenza la velocità delle onde, espressa dalla seguente legge:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}}$$

dove c rappresenta la velocità dell'onda nel vuoto (0.3 m/ns);

- lunghezza d'onda  $\lambda$  del segnale, la quale influenza la risoluzione, pari ad 1/3 della lunghezza, è funzione della frequenza *f* ed è ricavabile dalla velocità dell'onda nel mezzo:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

L'elaborazione dei segnali riflessi permette di ricavare un'immagine della sezione perpendicolare alla direzione di scorrimento nota come "radargramma" (Figura 43).



Figura 43: Radargramma ottenuto durante la prova GPR [27]

La forma degli oggetti contenuti in quest'ultimo può essere di due tipi:

 ad iperbole (Figura 44), tipica di bersagli posizionati ortogonalmente alla linea di scansione in quanto il difetto è colto dal fascio radar in un intorno che precede e segue la perpendicolare rispetto al suo punto medio;



Figura 44: Forma dei difetti ortogonali alla linea di scansione [27]

• sub-orizzontale (Figura 45), tipica di bersagli disposti parallelamente alla linea di scansione.



Figura 45: Forma dei difetti paralleli alla linea di scansione [27]

## 3.2.13 Acoustic Emissions (AE)

La prova ad Emissioni Acustiche misura l'integrità e lo stato di danno di una struttura attraverso la rilevazione, attraverso trasduttori piezoelettrici, delle onde elastiche generate da microspostamenti dovuti a deformazioni plastiche o alla formazione e alla propagazione di cricche.

Le onde così prodotte vengono successivamente filtrate, amplificate e convertite in segnali elettrici.

Le caratteristiche di questi ultimi variano in funzione dell'evoluzione del danneggiamento (Figura 46):

- all'inizio, a causa della nascita di microfessurazioni all'interno del materiale, è possibile misurare pochi segnali ad alta frequenza (50 kHz – 1MHz) e aventi piccola ampiezza;
- successivamente, a causa dell'aumento delle dimensioni della frattura, avviene un proporzionale e graduale aumento di ampiezza e numero di emissioni acustiche registrate, unitamente ad una diminuzione di frequenza (1-10 kHz); il fenomeno prosegue fino a rottura della struttura.



Figura 46: Andamento delle emissioni acustiche in funzione del livello di danno (basso a sinistra, alto a destra) [20]

La strumentazione utilizzata per l'esecuzione di questa prova consta di:

- un amplificatore;
- un filtro, che processa il segnale e rimuove disturbi correlati a fenomeni ambientali esterni o alla strumentazione stessa (background noise);
- un misuratore di soglia;
- un contatore di oscillazioni;
- un registratore.

La prova è condotta nel dominio delle frequenze ma l'analisi viene effettuata nel dominio del tempo attraverso l'applicazione dell'anti-trasformata di Fourier.

Il segnale può essere misurato attraverso due distinte metodologie: il "Ring-Down Counting", che misura il numero di oscillazioni di un segnale che oltrepassano la soglia, e il "Counting of Events", che misura il numero di segnali che oltrepassano la soglia (Figura 47).



Figura 47: Misura del segnale - Ring Down Counting (a sinistra) e Counting Events (a destra) [20]

I risultati ottenuti attraverso uno dei due metodi vengono successivamente utilizzati per l'interpretazione del segnale attraverso alcuni parametri, tra cui:

 il "b-value", un parametro inversamente proporzionale al livello tensionale che raggiunge il suo massimo prima della comparsa della frattura ed espresso dalla legge di Gutenberg – Ritcher:

$$\log N = a - b * \binom{A_{dB}}{20}$$

dove a è un coefficiente legato al background noise e N è il numero di eventi aventi ampiezza superiore alla soglia  $A_{db}$ ;

 l'I<sub>b</sub> value o "Improved b-value", che prescinde dall'intervallo di ampiezza e dal numero di eventi considerati in quanto determinato attraverso parametri statistici quali media μ e deviazione standard σ:

$$I_b = \frac{\log N (\mu + \alpha_1 \sigma) - \log N (\mu - \alpha_2 \sigma)}{(\alpha_1 + \alpha_2)\sigma} \qquad \text{con } \alpha_1 \in \alpha_2 \text{ generalmente pari ad } 1.$$

## 3.2.14 Analisi Modale Sperimentale (EMA)

Le indagini dinamiche sfruttano le ipotesi di linearità nel comportamento dinamico e la stazionarietà delle caratteristiche dinamiche nel tempo per poter studiare la risposta della struttura a delle forzanti impulsive e valutarne il grado di ammaloramento.

L'obiettivo di questa prova, nota come "Analisi Modale Sperimentale" o "EMA", è di ottenere un'identificazione dinamica attraverso le frequenze (ottenute dalle pulsazioni  $\omega$ ), i rapporti di smorzamento e i modi propri della struttura ed è per questo nota come "problema inverso".

La strumentazione adottata per questo tipo di prova consta di:

- diversi accelerometri posizionati in punti della struttura in modo da analizzare la risposta globale e tener conto di eventuali modi torsionali dovuti ad asimmetrie geometriche e/o di carico ;
- un convertitore;
- un filtro antialiasing per la rimozione della componente continua del segnale e dei disturbi ambientali;
- una centralina di elaborazione.

I metodi di analisi, a singolo o a più gradi di libertà, possono essere di tre tipi:

- 1. ad una risposta dovuta una singola forzante (SISO);
- 2. a molteplici risposte dovute ad una sola eccitazione (SIMO);
- 3. a molteplici risposte dovute a molteplici forzanti (MIMO).

La risposta è analizzata in due domini:

• quello relativo al tempo, basato su un set di equazioni differenziali del seguente tipo:

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

• quello relativo alle frequenze, ottenuto tramite Trasformata di Fourier dal dominio del tempo e basato su un sistema di equazioni differenziali di seguito esposte:

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

Attraverso il rapporto della Trasformata del sistema e quella della forzante è possibile ottenere la "funzione di risposta in frequenza (FRF)", da cui è possibile estrarre i parametri modali mediante "Peak Picking (PP)": tale tecnica consiste nella identificazione delle frequenze naturali mediante la lettura dei picchi di risposta nei grafici degli spettri di risposta, i corrispondenti modi vibrazionali e gli smorzamenti. Le caratteristiche così ottenute permettono così di costituire un modello della struttura indagata da confrontare con un modello analitico creato dalla conoscenza delle caratteristiche geometriche e meccaniche dell'opera; in questo modo, è possibile verificare la differenza tra le due risposte in termini di frequenze e vettori di forme modali (Figura 48) ed evidenziare la presenza di ammaloramento.



Figura 48: Confronto tra deformata modale teorica e quella elaborata attraverso EMA [38]

# Capitolo 4 – Il caso studio

Il caso studio è rappresentato dal cavalcavia di Corso Grosseto a Torino.

Il cavalcavia, inaugurato nel 1971 e recentemente demolito, verrà sostituito da un nuovo collegamento alla linea ferroviaria Torino-Ceres e presenta diversi segni di ammaloramento.

Da esso, è stato possibile prelevare alcuni elementi strutturali, evidenziati in verde in Figura 49, per poter studiare gli effetti dei fenomeni corrosivi e di degrado non indotti artificialmente su una struttura esistente.



Figura 49: Travi prelevate dagli impalcate del cavalcavia di Corso Grosseto

# 4.1 Operazioni e prelievi nel cantiere di Corso Grosseto

Nel periodo compreso tra il 30/04/2019 e il 13/05/2019 sono state prelevate 25 travi a T e 4 travi a cassone, tutte precompresse e prefabbricate, da quattro impalcati appartenenti al cavalcavia di Corso Grosseto e adiacenti alla spalla situata in Corso Potenza. In aggiunta alle travi, è stato possibile prelevare due pulvini.

La loro identificazione ha previsto la numerazione delle pile di appoggio e una numerazione progressiva delle travi che rispetta la posizione originale delle stesse sull'impalcato (Figura 50). Una volta prelevati, gli elementi sono stati trasportati, attraverso bilici, all'interno del campo prova di Mirafiori e successivamente poggiati su appositi blocchi New Jersey tramite autogru.



Figura 50: Identificazione delle travi appartenenti alla campata avente come estremi la pila 47 e la pila 46

In seguito, sono stati effettuati dei carotaggi (Figura 51) con relativi test di carbonatazione e dei prelievi di barre d'armatura all'interno delle pile (Figura 52).



Figura 51: Posizione dei carotaggi effettuati sulla pila 47 ed esecuzione dei carotaggi



Figura 52: Provini dopo il test di carbonatazione e barra 49-2 con relative staffe appartenenti alla pila 49

Per poter effettuare una migliore classificazione e identificazione, sono stati adottati i seguenti accorgimenti:

 le facce di ogni pila sono state numerate, in particolar modo le facce esposte su Corso Grosseto sono state identificate come le facce 1-2, mentre le facce esposte su Corso Potenza sono state identificate con i numeri 3-4;

- ogni pila è stata divisa in tre livelli in altezza, in modo da poter distinguere i carotaggi effettuati sulla stessa faccia;
- ad ogni provino è stata associata la relativa profondità di carbonatazione Hc e la posizione del centro di carotaggio all'interno di un sistema di riferimento x-y avente origine sullo spigolo esterno di ogni faccia, a livello del piano campagna (Figura 53);
- le barre longitudinali sono state numerate tramite il numero di pila di appartenenza e un numero progressivo;
- le staffe prelevate sono state associate alle barre longitudinali da esse racchiuse.



Figura 53: Sistemi di riferimento adottati per i carotaggi

Di seguito vengono mostrati i dati ricavati da ogni prelievo (Figura 55, Figura 56, Figura 57) e la posizione delle travi nel sito di Mirafiori (Figura 54).

Da essi, risulta facile notare come la profondità di carbonatazione sia maggiore nelle zone di maggior azione delle acque piovane, ovvero alle estremità dei pulvini e nel lato preposto all'accoglienza delle tubazioni di scolo delle acque piovane.

Risulta altresì evidente come la profondità di carbonatazione abbia raggiunto le armature.





Figura 54: Pianta relativa alla disposizione delle travi nel sito di Mirafiori

S N Pila 46 Lato C.so Grosseto





Sigla provino	Altezza provino	Coordinate cent	ro di estrazione	Profondità di carbonatazione
h [cm]		x [cm]	y [cm]	Hc [mm]
P46-L1-1	43	38	21	30
P46-L2-2	43	36	167	28
P46-L3-1	35	37	237	40
P46-L1-3	40	37	108	48
P46-L2-4	36	35	180	0
P46-L3-3	34	37	265	38



Figura 55: Classificazione dei provini e delle barre prelevati - Pila 46

Pila 47 Lato C.so Grosseto

Pila 47 Lato C.so Potenza



Sigla provino	Altezza provino	Coordinate cent	ro di estrazione	Profondità di carbonatazione
	h [cm]	x [cm]	y [cm]	Hc [mm]
P47-L2-1	31	33	130	30
P47-L1-2	21	33	20	30
P47-L3-1	44	35	205	30
P47-L2-3	44	34	130	5
P47-L3-3	45	37	238	30
P47-L1-4	39	40	70	15





C.so Potenza

Identificativo barra	Lunghezza barra [cm]	Diametro barra [mm]	Numero staffe adiacenti prelevate
47-1	92	32	2
47-2	90	32	2
47-3	72	12	Z

Figura 56: Classificazione dei provini e delle barre prelevati - Pila 47

Pila 49 Lato C.so Grosseto

Pila 49 Lato C.so Potenza



Sigla provino	Altezza provino	Coordinate cent	ro di estrazione	Profondità di carbonatazione
h [cm]		x [cm]	y [cm]	Hc [mm]
P49-L1-1	40	36	70	28
P49-L2-2	32	25	170	30
P49-L1-2		35	15	24
P49-L1-3	42	41	65	40
P49-L2-4	42	37	170	30
P49-L3-3		38	225	42



Identificativo barra	Lunghezza barra [cm]	Numero staffe adiacenti prelevate
49-1	60	
49-2	80	4
49-3	60	
49-4	90	

Figura 57: Classificazione dei provini e delle barre prelevati - Pila 49
## 4.2 Valutazione della capacità portante di progetto

La capacità portante delle travi è stata determinata in termini di momento e taglio resistenti dai dati contenuti nelle relazioni tecniche del cavalcavia e attraverso ricerche sulle prove effettuate, da parte del Politecnico, sui materiali costituenti il cavalcavia.

Non essendo esplicitata all'interno delle relazioni, è stato necessario effettuare in sito una prova pacometrica al fine di misurare il diametro e il passo dell'armatura a taglio presente.

I risultati di seguito mostrati sono relativi alla T6-P47/P46 e alla C2-SP/P47, in quanto maggiormente ammalorate.

### 4.2.1 Ricerca prove in archivio cartaceo

Il primo step per la valutazione ha previsto una fase di ricerca delle prove condotte, da parte del Politecnico, sui materiali costituenti il cavalcavia.



Negli allegati dal n. \_1\_\_\_\_\_ al n. \_8\_\_\_\_ sono riportati i diagrammi di deformazione

NP/

Torino li 17 Novembre 1970

Figura 58: Esempio di una prova a trazione eseguita sui trefoli precompressi del cavalcavia di corso Grosseto



Figura 59: Esempio di diagramma tensione-deformazione ottenuto da una prova a trazione

Le prove risultano effettuate durante il periodo di costruzione, in un arco temporale che va dalla seconda metà degli anni '70 alla prima metà del '72.

Attraverso esse è stato possibile confermare i dati forniti nelle relazioni tecniche riguardo l'armatura da precompressione e mostrate nel successivo paragrafo.

In Tabella 4 si espongono i risultati delle prove.

	Prova del 17 Novembre 1970 (su filo)								
	Matassa n°	Diametro	Area	Limite	Limite elastico				
N°		[mm]	[mm²]	0,1% [kg/mm²]	0,2% [kg/mm²]	Totale [kg]	Unitario [kg/mm²]	All [%]	
1	00034	7,00	38,48	168,5	172,5	7160	186,1	8,6	
2	393	7,04	38,92	142	146,5	6720	172,7	7,6	
3	401	6,98	38,26	170	173,5	7080	185	7	
4	389	7,02	38,7	158,5	162	7010	181,1	7,9	
5	421	7,00	38,48	170	173,5	7100	184,5	7,2	
6	00058	7,00	38,48	166	170,5	6980	181,4	6,9	
7	00006	7,00	38,48	165	168	7080	184	7,6	
8	00015	6,98	38,26	173	177	7140	186,6	6,6	

Tabella 4: Risultati delle prove s	sull'armatura da precompressione a	adottata nel cavalcavia di Corso Grosseto
------------------------------------	------------------------------------	---

					Prova del	22 Dicembre	1970				
		φ filo		A <sub>tot</sub>	A <sub>tot</sub> Limite elastico		Limite elastico	Caric	Tensio		
N °	N° fili	int. [mm]	est. [mm]	ne [mm <sup>2</sup> ]	0,1% [kg/mm²]	0,2% [kg/mm²]	1% di deformazi one totale [kg/mm <sup>2</sup> ]	rottu ra [kg]	rottura [kg/m m <sup>2</sup> ]	Fili rotti	All [%]
1	7	4,03	4,11	92,3	144	147,5	148,5	1564 0	169,4	7	6,2
2	7	4,24	4,09	92,9	151,5	157	157,5	1652 0	177,8	7	6
3	7	4,24	4,11	93,7	151,5	156	156	1632 0	174,2	7	5,7
4	7	4,24	4,09	92,9	151	156,5	157,5	1660 0	178,7	7	5,7
5	7	4,24	4,04	91	154,5	159,5	160	1624 0	178,5	7	5,9
6	7	4,24	4,13	94,5	149	154	154,5	1628 0	172,3	7	5,7
7	7	4,03	4,11	92,3	147	152,5	153,5	1586 0	171,8	7	5,8
8	7	4,24	4,11	93,7	149	154	155	1660 0	177,1	7	6
9	7	4,14	4,11	93,1	142,5	147,5	148,5	1560 0	167,5	7	6,3
1 0	7	4,24	4,09	92,9	151,5	156,5	157,5	1664 0	179,1	7	6,3

					Prova del	18 Marzo 19	71				
		φ	filo	A <sub>tot</sub>	Limite	elastico	Limite elastico	Caric o rottu ra [kg]	Tensio		
N °	Rotolo n°	int. [mm]	est. [mm]	sezio ne [mm <sup>2</sup> ]	0,1% [kg/mm²]	0,2% [kg/mm²]	1% di deformaz ione totale [kg/mm <sup>2</sup> ]		rottur a [kg/m m <sup>2</sup> ]	Fili rotti	All [%]
1	1	4,11	4,24	93,7 2	153	158	158	1650 0	176	7	5,3
2	2	4,1	4,24	93,3 3	154	158,5	159	1650 0	176,8	7	5,2
3	3	4,1	4,24	93,3 3	154	159	158,5	1650 0	176,8	7	5,5
4	4	4,08	4,24	92,5 6	155,5	160	160,5	1650 0	178,3	7	5,7
5	5	4,11	4,24	93,7 2	152	157,5	159	1640 0	175	7	5,5
6	6	4,11	4,24	93,7 2	152	158,5	158,5	1635 0	174,4	7	5,2
7	7	4,1	4,24	93,3 3	152,5	158	159,5	1640 0	175,7	7	5,6
8	8	4,11	4,24	93,7 2	155,5	161	160	1666 0	177,8	7	5,3
9	9	4,1	4,24	93,3 3	155,5	161	159	1655 0	177,3	7	5,1
1 0	10	4,11	4,24	93,7 2	154	159,5	160	1655 0	177,6	7	5,2

## 4.2.2 Caratteristiche geometriche e meccaniche

Le travi oggetto di studio presentano uno schema statico di tipo appoggio-appoggio con luce L=19,55 m e soletta collaborante; inoltre, esse sono state realizzate pre-tese in sito con trefoli da  $\frac{1}{2}$ " aventi sezione A=92 mm<sup>2</sup>, tensione caratteristica di rottura f<sub>pk</sub> pari a 1670 MPa e sottoposti ad un tiro pari a 1300 MPa.

Le caratteristiche di resistenza del calcestruzzo non sono note, ma è nota la sola resistenza minima necessaria del cls all'atto di distensione dei trefoli, che per le travi di bordo (a cassone) risulta 38,7 MPa. Di conseguenza, si è supposta una resistenza  $R_{ck}$ =45 MPa per le travi e  $R_{ck}$ =35 MPa per la soletta.

Le resistenze di progetto sono fornite in Tabella 5:

Tabella 5: Caratteristiche meccaniche delle travi precompresse

	R <sub>ck</sub> [MPa]	f <sub>ck</sub> [MPa]	f <sub>cd</sub> [MPa]	ε <sub>c2</sub> [%0]	ε <sub>cu2</sub> [%0]	f <sub>cm</sub> [MPa]	E <sub>cm</sub> [MPa]	f <sub>ctm</sub> [MPa]	f <sub>ctk0,05</sub> [MPa]	f <sub>ctd</sub> [MPa]
Trave	45	37,4	21,2	2	3,5	45,4	34625	3,4	2,3	1,6
Soletta	35	29,1	16,5	2	3,5	37,1	32588	2,8	2,0	1,3

	f <sub>pk</sub> [MPa]	fp0,1k [MPa]	f <sub>p0,1d</sub> [MPa]	E [Mpa]	ε <sub>yd</sub> [%0]	ε <sub>ud</sub> [%0]
Trefoli	1670	1518,2	1320,2	196000	6,74	31,5

Per le travi a T (Figura 60) sono stati adottati 20 trefoli da precompressione, di cui 3 sono stati posti nell'ala superiore e i restanti 17 nell'ala inferiore, su due file (9+8).



Figura 60: Sezione tipologica trave a T

Per le travi di bordo (Figura 61) sono stati adottati invece 40 trefoli, 6 disposti su 2 file nel corrente superiore (1+2) e i restanti 34 nel corrente inferiore, disposti su 3 file (16+16+2).



Figura 61: Sezione tipologica trave di bordo

Al fine di evitare l'utilizzo della piena precompressione in tutte le sezione delle travi, alcuni trefoli sono stati provvisti di guaina in modo da non poter sviluppare aderenza col calcestruzzo e trasferire sforzi alla sezione.

Tutte le travi sono state realizzate a sezione piena (rettangolare) in prossimità degli appoggi per una lunghezza pari a 1 metro, per poi raccordarsi progressivamente alle sezioni precedentemente mostrate poste a 1,3 metri.

Le caratteristiche geometriche relative al solo calcestruzzo sono mostrate in Tabella 6:

Sezione di calcolo	A [mm <sup>2</sup> ]	S [mm <sup>3</sup> ]	y <sub>G</sub> [mm]	I [m <sup>4</sup> ]
Rettangolare piena (T)	619057	324480000	524	0,055
Т	296590	147941667	499	0,039
Rettangolare piena (cassone)	1223236	675099333	552	0,122
Cassone	299357	147941667	494	0,040

Tabella 6: Proprietà geometriche delle sezioni di calcolo

#### 4.2.3 Momento resistente

Per poter determinare il momento resistente massimo è stato necessario innanzitutto trovare la lunghezza di ancoraggio  $l_{bpd} = l_{pt,2} + \alpha_2 \Phi \frac{\sigma_{pd} - \sigma_{pm,inf}}{f_{bpd}}$ , dove:

- $l_{pt,2} = 1.2 l_{pt};$
- $l_{pt} =$ lunghezza di trasmissione =  $\alpha_1 \alpha_2 \Phi \frac{\sigma_{pm,0}}{f_{bpt}}$ ;
- $\alpha_1 = 1,25$  (rilascio improvviso);
- $\alpha_2 = 0.19$  (trefoli a 7 fili);
- $\sigma_{pm,0}$  = 1300 MPa (tensione nell'armatura di precompressione all'istante del rilascio;
- $f_{bpt} = \eta_{p1}\eta_1 f_{ctd}$  (tensione di aderenza);
- $\eta_{p1} = 3,2$  (trefoli a 7 fili);
- $\eta_1 = 1$  (buona aderenza);
- $\sigma_{pd}$  = tensione nell'armatura da precompressione;
- $\sigma_{pm,inf}$  = tensione di precompressione a tempo infinito;
- $f_{bpd} = \eta_{p2} \eta_1 f_{ctd}$  (tensione di aderenza allo SLU);
- $\eta_{p2}=1,2$  (trefoli a 7 fili).

Di conseguenza, è stato necessario calcolare la caduta di precompressione a tempo infinito; per farlo, si sono stimati i carichi agenti su ogni trave, pari al peso proprio  $G_1$  (calcolato) e al peso degli elementi permanenti non strutturali  $G_2$  (fornito nella relazione di calcolo), moltiplicati per i propri coefficienti allo SLU ( $\gamma$ ). Il carico q e i momenti M in mezzeria che ne derivano risultano pari a:

- q= 12.59 kN/m e M=1154.6 kNm per le travi a T;
- q=15.46 kN/m e M=1417.1 kNm per le travi di bordo.

Da qui, è stato possibile calcolare le cadute di tensione ad ogni livello dei trefoli, date dalla seguente formulazione:

$$\Delta \sigma_p = \frac{E_s \varepsilon_{c,sh} + \alpha \sigma_{c0} \varphi(t; t_0) + X \Delta \sigma_{ril}}{1 + \alpha \frac{A_p}{A_c} \left( 1 + \frac{A_c Z_{cp,r} Z_{cp,i}}{J_c} \right) (1 + X \varphi(t; t_0))}$$

dove

-  $\varepsilon_{c,sh}$  è la deformazione da ritiro, determinata tramite interpolazione lineare per un'umidità relativa pari a UR=75% e con un h<sub>0</sub> (rapporto tra perimetro bagnato e il doppio dell'area della sezione) pari a 189,8 per le travi a T e 191,2 per le travi a cassone;

- A è il rapporto tra il modulo elastico del calcestruzzo E<sub>c</sub> e il modulo dell'acciaio E<sub>s</sub>;
- $\sigma_{c0}$  è la tensione nel calcestruzzo al livello dei trefoli;
- $\varphi(t; t_0)$  è il coefficiente di viscosità del calcestruzzo, determinato con gli stessi parametri precedentemente introdotti e per un tempo di carico iniziale superiore a 60 giorni;
- $\Delta \sigma_{ril}$  è stato determinato considerando l'acciaio di classe 2 ( $\rho_{1000} = 2,5$ );

-  $z_{cp,r}$  e  $z_{cp,i}$  sono rispettivamente l'eccentricità del trefolo risultante e del trefolo i-esimo. I risultati dei calcoli effettuati sono mostrati in Tabella 7:

	$\Delta \sigma_{p}$ [Mpa]	σ <sub>pm,inf</sub> [Mpa]	l <sub>bpd</sub> [cm]
Trefoli ala inferiore (T)	115,9	1184,1	108,9
Trefoli ala superiore (T)	248,7	1051,3	126,0
Trefoli ala inferiore (cassone)	155,9	1144,1	114,0
Trefoli ala superiore (cassone)	225,8	1074,2	123,0

Tabella 7: Perdite di tensione e lunghezza di ancoraggio dei trefoli

Successivamente, si è calcolata la tensione nei trefoli considerando la precompressione come un effetto resistente: in questo modo, la deformazione totale è risultata la somma di quella dovuta al campo allo SLU e quella dovuta alla pre-deformazione indotta dal tiro; si è trascurata la presenza di armatura lenta nella soletta (Tabella 8, Tabella 9).

Si è considerata la lunghezza di ancoraggio relativa ad ogni livello di trefoli.

Infine, sono stati determinati i momenti resistenti massimi in ogni sezione facendo polo sulla risultante delle compressioni nel cls e considerando la resistenza a rottura f<sub>cm</sub>. I risultati ottenuti, mostrati nei seguenti paragrafi, sono stati traslati per la relativa lunghezza di ancoraggio ad ogni cambiamento di geometria nei trefoli.

Essendo il momento simmetrico, ci si è limitati all'analisi di metà trave (Figura 62, Figura 63, Figura 64, Figura 65).

### - Trave a T



Figura 62: Sezioni di calcolo del momento resistente delle travi a T con relativi trefoli attivi

Tabella 8: Posizione asse neutro, deformazione del calcestruzzo e momento resistente delle sezioni di calcolo delle travi a T

Sezione di calcolo	x [mm]	M <sub>rd</sub> [kNm]	ε <sub>c</sub> [‰]	Rottura
Rettangolare piena (T-16 trefoli)	112	1377	3,15	Polo sull'acciaio (campo 2)
T (16 trefoli)	122	1509	3,47	Polo sull'acciaio (campo 2)
T (17 trefoli)	129	1608	3,50	Polo sul cls (campo 3)
T (20 trefoli)	149	1932	3,50	Polo sul cls (campo 3)

z [m]	M <sub>rd</sub> [kNm]
0	0
1	1377
1,3	1509
3	1509
4,3	1608
6	1608
7,3	1932
9,75	1932



Figura 63: Momento resistente relativo alle travi a T

### - Trave di bordo



Figura 64: Sezioni di calcolo del momento resistente delle travi di bordo con relativi trefoli attivi

Tabella 9: Posizione asse neutro, deformazione del calcestruzzo e momento resistente delle sezioni di calcolo delle travi di bordo

Sezione di calcolo	x [mm]	M <sub>rd</sub> [kNm]	ε <sub>c</sub> [% <sub>0</sub> ]	Rottura
Rettangolare piena (cassone-28 trefoli)	103	2295	2,69	Polo sull'acciaio (campo 2)
Cassone (28 trefoli)	118	2729	3,14	Polo sull'acciaio (campo 2)
Cassone (32 trefoli)	131	3186	3,50	Polo sul cls (campo 3)
Cassone (36 trefoli)	164	3603	3,50	Polo sul cls (campo 3)
Cassone (40 trefoli)	180	4039	3,50	Polo sul cls (campo 3)

z [m]	M <sub>rd</sub> [kNm]
0	0
1	2295
1,3	2729
2	2729
3,2	3186
3,5	3186
4,7	3603
5	3603
6,2	4039
9,75	4039



Figura 65: Momento resistente delle travi di bordo

#### 4.2.3 Taglio resistente

Rilevata la presenza e la posizione delle staffe, è stato possibile determinare la resistenza massima a taglio relativa al calcestruzzo e all'armatura a taglio attraverso le formulazioni note dello SLU associato:

$$V_{RCd} = \alpha_{cw} v_1 0.9 b_w df_{cd} \frac{(\cot \theta + \cot \alpha)}{(1 + \cot^2 \theta)}$$
$$V_{RSd} = 0.9 df_{yd} \frac{A_{sw}}{s \sin \alpha} (\cot \theta + \cot \alpha) \sin^2 \alpha$$

Per tener conto delle imperfezioni di posa dell'armatura trasversale, la resistenza a tagliotrazione è stata determinata su una media mobile del passo s di tre staffe consecutive.

La resistenza massima ottenibile è stata calcolata considerando un  $\theta$ =21.7°, in modo da massimizzare il contributo dato dalle staffe a causa della inadeguatezza dell'armatura.

I passi riscontrati dalla prova pacometrica e i risultati ottenuti sono i seguenti (Figura 66, Figura 67):

s [cm]	21
33	25
25	25
16	23
28	26
20	24
18	49
21	24
20	23
30	20
22	24
32	25
15	25
43	23
20	24

25	
24	
14	
28	
25	
22	
12	
24	
24	
19	
25	
24	
27	
24	
29	

28	
20	
54	
31	
18	
22	
24	
23	
15	
15	
23	
22	
20	
22	
23	

24
23
24
27
23
23
22
16
23
19



Figura 66: Passo staffe e diagramma di taglio resistente relativi alla trave T6-P47/P46

## - Trave di bordo

s [cm]
10
19
13
9
14
18
7
12
12
7
13
23
33
13
13
21
32
21
23
23
24
24
28
22
29
25
31
20

27	
26	
32	
41	
16	
24	
32	
27	
27	
29	
33	
28	
28	
27	
36	
24	
22	
25	
30	
27	
26	
31	
26	
28	
28	
31	
35	
23	
20	

31
28
30
17
36
23
34
30
24
29
26
28
22
25
26
12
16
30
30
9
9
17
13
11
13
10
9



Figura 67: Passo staffe e diagramma di taglio resistente relativi alla trave C2-SP/P47

## 4.3 Restituzione fotografica e misurazioni in cantiere

Per poter studiare gli effetti della corrosione sugli elementi oggetto di indagine, è stata effettuata una mappatura delle fessure, riscontrate sulle testate, sui profili laterali e sugli intradossi, attraverso una serie di strisciate ottenute mediante l'utilizzo di una fotocamera munita di treppiedi.

La Figura 68 mostra il risultato ottenuto per la trave T6-P47/P46, la quale ha mostrato un grado di ammaloramento maggiore:



Figura 68: Ricostruzione dei prospetti laterali e intradosso della trave T6-P47/P46

Successivamente, è stato possibile, attraverso l'utilizzo di un fessurimetro ottico, effettuare la misura dell'ampiezza delle fessure presenti, trascurando quelle dovute a cause non corrosive (ritiro del calcestruzzo e simili).

Infine, si è misurata l'altezza e la larghezza della soletta ad interassi pari a un metro.

Il risultato finale, comprensivo di foto delle testate e di foto di dettaglio relative a zone particolarmente ammaloramente o soggette a danneggiamenti causati dall'utilizzo di una carotatrice, necessaria per poter effettuare dei fori e permettere il passaggio delle imbracature necessarie al sollevamento delle travi, è visionabile all'interno degli allegati.

## 4.4 Valutazione numerica del degrado e delle resistenze attuali

La valutazione del degrado è stata effettuata misurando il parametro CT (paragrafo 2.1) e ricavando, a partire dall'apertura massima  $w_{max}$ , la profondità media di corrosione  $x_{ave}$ ; una volta nota quest'ultima, è stato possibile determinare il diametro resistente dei trefoli  $\phi$  e di conseguenza la percentuale di corrosione, da cui si sono ricavate le resistenze allo stato attuale.

I calcoli sono stati preceduti dalle seguenti considerazioni:

- le resistenze sono state stimate in funzione del tipo e della posizione della fessura;
- le fessure verticali sono state adottate per il calcolo del degrado delle staffe, mentre quelle orizzontali per i trefoli;
- date le condizioni di danno, per la T6-P47/P46 si è considerata una corrosione uniforme delle staffe per i primi 1.3 metri, con una w<sub>max</sub> pari a 1.7 mm;
- date le condizioni di danno, per la T6-P47/P46 si è considerata una corrosione uniforme dei trefoli per i primi 3 metri, con una w<sub>max</sub> pari a 2.5 mm, ottenuta come media tra l'ampiezza di 3.1 mm misurata in testata e quella da 2 mm misurata in intradosso;
- date le condizioni di danno, per la C2-SP/P47 si è considerata una corrosione uniforme delle staffe lungo tutto lo sviluppo della trave, con una w<sub>max</sub> pari a 1 mm;
- date le condizioni di danno, per la C2-SP/P47 si è considerata una corrosione uniforme dei trefoli inferiori esterni (evidenziati in Figura 69) lungo tutto lo sviluppo della trave, con una w<sub>max</sub> pari a 3.5 mm;
- date le condizioni di danno, per la C2-SP/P47 si è considerata una corrosione uniforme dei trefoli superiori dell'ala esterna (evidenziati in Figura 69) lungo tutto lo sviluppo della trave, con una w<sub>max</sub> pari a 2.4 mm.



Figura 69: Trefoli inferiori (a sinistra) e superiori (a destra) considerati corrosi nella stima della capacità portante

# I risultati sono esposti in Tabella 10:

Armatura	α	β	f <sub>ctm</sub> [MPa]	c [mm]	φ₀ [mm]	СТ
Trefoli	0.62	1 1 1	2.25	45	12,7	0,71
Staffe	0,03	1,41	5,55	30	8	0,70

Tabella 10: Resistenze delle armature a seguito della corrosione

Collocazione armature	w <sub>max</sub> [mm]	x <sub>ave</sub> /R <sub>0</sub>	Xave	φ [mm]	Q <sub>corr</sub> [%]
T6-P47/P46 - Trefoli (3 m)	2,5	0,19	1,22	11,5	9,6
T6-P47/P46 - Staffe (1 m)	1,7	0,13	0,52	7,5	6,5
C2-SP/P47 - Trefoli inferiori	3,5	0,28	1,75	11,0	13,8
C2-SP/P47 - Trefoli superiori	2,4	0,18	1,16	11,5	9,2
C2-SP/P47 - Staffe	1	0,07	0,29	7,7	3,7

Collocazione armature	f <sub>pk0</sub> [MPa]	f <sub>uk0</sub> [MPa]	ε <sub>u0</sub>	f <sub>pk</sub> [MPa]	f <sub>uk</sub> [MPa]	ε <sub>u</sub>
T6-P47/P46 - Trefoli (3 m)	1518	1670	31,5	1271,0	1382,3	13,4
T6-P47/P46 - Staffe (1 m)	450	540	67,5	400,5	477,1	41,3
C2-SP/P47 - Trefoli inferiori	1518	1670	31,5	1163,1	1256,6	5,5
C2-SP/P47 - Trefoli superiori	1518	1670	31,5	1281,6	1394,7	14,2
C2-SP/P47 - Staffe	450	540	67,5	422,1	504,5	52,7

## 4.5 Valutazione della capacità portante attuale e confronto

Si espongono di seguito i risultati dei calcoli di capacità portante allo stato attuale.

## - Trave a T

Sezione 0 - 1 m Sezione 1,3 - 3 m



Figura 70: Sezioni di calcolo del momento resistente delle travi a T allo stato corroso

Tabella 11: Posizione asse neutro, deformazione del calcestruzzo e momento resistente delle sezioni di calcolo delle travi a T allo stato corroso

Sezione di calcolo	x [mm]	M <sub>rd</sub> [kNm]	ε <sub>c</sub> [‰]	Rottura
Rettangolare piena (T-16 trefoli)	153	1077	1,23	Polo sull'acciaio (campo 2)
T (16 trefoli)	160	1186	1,30	Polo sull'acciaio (campo 2)

z [m]	M <sub>rd</sub> [kNm]
0	0
1	1077
1,3	1186
3	1186
4,3	1608
6	1608
7,3	1932
9,75	1932





Figura 71: Diagramma di momento e taglio resistente relativi alla trave T6-P47/P46 allo stato corroso

## - Trave di bordo

Sezione di calcolo	x [mm]	M <sub>rd</sub> [kNm]	ε <sub>c</sub> [‰]	Rottura
Rettangolare piena (cassone-28 trefoli)	8	1884	2,26	Polo sull'acciaio (campo 2)
Cassone (28 trefoli)	111	2527	2,92	Polo sull'acciaio (campo 2)
Cassone (32 trefoli)	122	2988	3,25	Polo sull'acciaio (campo 2)
Cassone (36 trefoli)	138	3438	3,50	Polo sul cls (campo 3)
Cassone (40 trefoli)	165	3863	3,50	Polo sul cls (campo 3)

Tabella 12: Posizione asse neutro, deformazione del calcestruzzo e momento resistente delle sezioni di calcolo delle travi di bordo allo stato corroso

z [m]	M <sub>rd</sub> [kNm]
0	0
1	1884
1,3	2527
2	2527
3,2	2988
3,5	2988
4,7	3438
5	3438
6,2	3863
9,75	3863





Figura 72: Diagramma di momento e taglio resistente relativi alla trave C2-SP/P47 allo stato corroso

Confrontando le resistenze, è stato possibile giungere alle seguenti conclusioni:

- la T6, come le altre travi a T, ha riscontrato un degrado maggiore nelle zone di estremità probabilmente a causa di una scarsa o incorretta impermeabilizzazione nelle zone di appoggio sulle pile;
- la C2, come altre travi di bordo, ha invece presentato sia un degrado uniforme su un solo lato, quello esposto agli agenti atmosferici, sia un degrado nelle zone di testata, come già visto per le travi a T;
- la corrosione dei trefoli relativi alla T6 ha comportato, nelle zone ammalorate, una diminuzione del momento resistente compresa tra il 21% e il 22%, come evidenziato in Figura 73;



Figura 73: Confronto tra il momento resistente di progetto e quello allo stato corroso relativi alla T6-P47/P46

• la corrosione delle staffe relative alla T6 ha comportato, nelle zone ammalorate, una diminuzione del taglio resistente pari all'11%, come mostrato in Figura 74;



Figura 74: Confronto tra il taglio resistente di progetto e quello allo stato corroso relativi alla T6-P47/P46

• la corrosione dei trefoli relativi alla C2 ha comportato una diminuzione del momento resistente (Figura 75) compresa tra il 18% (in estremità) e il 5% (in mezzeria);



Figura 75: Confronto tra il momento resistente di progetto e quello allo stato corroso relativi alla C2-SP/P47

• la corrosione delle staffe relative alla C2 ha comportato una diminuzione del taglio resistente compresa tra il 7% e l'8%, come mostrato in Figura 76;



Figura 76: Confronto tra il taglio resistente di progetto e quello allo stato corroso relativi alla C2-SP/P47

## Conclusioni

Il presente studio rappresenta una procedura di indagine che ha come fine la valutazione della capacità portante residua.

Durante questa procedura è stato possibile notare come gli elementi strutturali, in cui la profondità di carbonatazione ha raggiunto il livello delle armature, presentino corrosione solo nelle zone esposte ad agenti corrosivi: in questo caso, infatti, la corrosione dei pulvini e delle pile è risultata elevata a causa della presenza delle tubazioni di scolo delle acque meteoriche e della scarsa impermeabilizzazione dell'impalcato.

È stato altresì possibile notare come l'ammaloramento abbia colpito in maniera diversa le due tipologie di travi: nel caso delle travi a T risulta localizzato nelle sezioni di estremità (sempre a causa della scarsa impermeabilizzazione), mentre per le travi di bordo il danneggiamento risulta uniforme sul lato esposto all'acqua piovana e considerevole in corrispondenza delle testate.

L'analisi effettuata, sebbene limitata alla valutazione del degrado derivante dalla corrosione, ha condotto ad una diminuzione di resistenza, in alcuni casi, del 22%. Tuttavia, analisi più approfondite porterebbero ad una valutazione maggiormente accurata considerando anche l'effettivo stato del calcestruzzo.

Di conseguenza, il presente lavoro risulta aperto a nuove analisi che permetterebbero una dettagliata valutazione delle caratteristiche meccaniche dei materiali e un'integrazione con le variazioni di resistenza del calcestruzzo, in modo da poter stimare riduzioni di capacità portante che rispecchino maggiormente le condizioni attuali degli elementi strutturali.

## Bibliografia e sitografia

- [1] Mario Collepardi, Il Nuovo Calcestruzzo Quarta edizione, Tintoretto;
- [2] Antonino Recupero, Nino Spinella, Francesco Tondolo, A Model for the Analysis of Ultimate Capacity of RC and PC, Hindawi, Volume 2018, Article ID 8697109;
- [3] Alessandro Cesetti, *Effect of corroded reinforcement in RC structures: From cracking to bond performance*, Politecnico di Torino (2017);
- [4] A. Masi, *La stima della resistenza del calcestruzzo in situ mediante prove distruttive e non distruttive*, DiSGG, Università degli Studi di Basilicata, Potenza;
- [5] Mario Montuori, Degradazione di strutture in calcestruzzo armato poste in ambiente urbano, rurale e marino, Seminario tecnico - La NTC ed il controllo dei Materiali: tecnica, professione e adempimenti su edifici nuovi o esistenti, 1 Dicembre 2009;
- [6] Edoardo Proverbio, Giuseppe Ricciardi, Vincenzo Venturi, Marco Venturi, Giovanni Laganà, Antonino Recupero, Gabriella Epasto, Giuseppe Campanella, Nuove Tecnologie per la Valutazione del Degrado e il Controllo di Strutture in Calcestruzzo Armato Precompresso, 2008;
- [7] A.D. Di Evangelista, C. Valente, L. Zuccarino, Prove di vibrazione di travi in c.a.p. per la valutazione del degrado da corrosione, Dipartimento PRICOS, Università "G. d'Annunzio" di Chieti-Pescara;
- [8] E. Proverbio, P. Longo, L. Gaillet, *Monitoraggio della corrosione sotto sforzo di acciai trafilati tramite emissione acustica;*
- [9] Giovanni Fabbrocino, C. Rainieri, G. M. Verderame, L'analisi dinamica sperimentale e il monitoraggio delle strutture esistenti, Università degli Studi del Molise, Consorzio ReLUIS, Università degli Studi "Federico II" di Napoli, Consorzio ReLUIS;
- [10] Antonio Bossio, Gian Piero Lignola, F. Fabbrocino, Tullio Monetta, *Nondestructive assessment* of corrosion of reinforcing bars through surface concrete cracks, Febbraio 2017;
- [11] Giuseppe Faella, Mariateresa Guadagnuolo, Alfonso Donadio, Luca Ferri, Calibrazione sperimentale del metodo SonReb per costruzioni della Provincia di Caserta degli anni 60-80, Seconda Università di Napoli, Abbazia di S. Lorenzo ad Septimum, 81031, Aversa (CE);
- [12] Alessio Farci, Gianluca Pagazzi, I Getti massivi e le variazioni termiche nel calcestruzzo, Dicembre 2013;

- [13] Roberto Bruson, Ponti: censimento e valutazione del degrado La gestione informatizzata dei dati, Collegio degli ingegneri della Provincia di Vicenza;
- [14] Maurizio Bruson, Settimo Martinello, Valutazione della capacità portante di un ponte, 4 EMME Service S.p.A.;
- [15] Settimo Martinello, Dalla valutazione numerica dello stato di degrado al collaudo, Gennaio 2007;
- [16] Edoardo Proverbio, Gabriella Epasto, Vincenzo Venturi, *Il metodo dell'Impact Echo per la valutazione dello stato di strutture in c.a.p.*, Aprile 2007;
- [17] Edoardo Proverbio, Vincenzo Venturi, P. Longo, L'approccio integrato alla valutazione del danno delle strutture in c.a.p. a cavi post-tesi. Un esempio pratico di applicazione di tecniche di indagine innovative: impact echo, emissione acustica, geo-radar (GPR), 2001;
- [18] Nenad Gucunski, Greg Slabaugh, Zhe Wang, Tong Fang and Ali Maher, Visualization and interpretation of Impact Echo data from bridge deck testing, December 2008 - Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board 2050(2050);
- [19] E. Gabrielli, C. Colla, G. Pascale, Il metodo Impact Echo per la valutazione dello stato di riempimento di guaine di post – compressione in strutture di calcestruzzo, DISTART - Università di Bologna;
- [20] Francesca Quinterno, La tecnica dell'Emissione Acustica per la diagnosi di strutture e infrastrutture: Il caso-studio della galleria a Borgo Ticino, Politecnico di Torino (2017);
- [21] Edi-Cem, Strade & Autostrade Costruzione e manutenzione di strade, autostrade, ponti, gallerie, 2017;
- [22] D. Coronelli and P. Gambarova, Structural assessment of corroded reinforced concrete beams: modeling guidelines, Journal of Structural Engineering, vol. 130, no. 8, pp. 1214–1224, 2004;
- [23] J. Cairns, G. Plizzari, Y. Du, D. W. Law, and C. Franzoni, *Mechanical properties of corrosion-damaged reinforcement*, ACI Materials Journal, vol. 102, no. 4, pp. 256–264, 2005.
- [24] Alonso, C., Andrade, C., Rodriguez, J., and Diez, J., *Factors controlling cracking of concrete affected by reinforcement corrosion*, Materials and Structures/Materiaux et Constructions, vol. 31, no. 211, pp. 435–441, 1996;
- [25] Rodriguez, J., Ortega, L., Casal, J., and Diez, J., Corrosion of reinforcement and service life of concrete structures, in: Proceedings of the Seventh International Conference on Durability of Building Materials and Components, London, UK, 1996, pp. 117–126;

- [26] Vidal, T., Castel, A., and François, R., *Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete*, Cement and Concrete Research, vol. 34, no. 1, pp. 165–174, 2004;
- [27] Veronica Corradetti, *Esperienza di tecniche diagnostiche non distruttive ai fini energetici e strutturali*, Politecnico di Torino (2011);
- [28] Andrade C., Cesetti, A., Mancini G., Tondolo F., *Estimation of corrosion attack in reinforced concrete by means of crack opening*, Structural Concrete, 2016 in press. DOI: 10.1002/suco.201500114;
- [29] Abdullah Almusallam, *Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars*, December 2001 - Construction and Building Materials 15(8):361-368;
- [30] J.G.Cabrera, Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion, Cement and Concrete Composites - Volume 18, Issue 1, 1996, Pages 47-59;
- [31] Pietro Pedeferri, *La corrosione nel calcestruzzo Fenomenologia, prevenzione, diagnosi e rimedi*, AICAP, progetto Ulisse, Pubblicemento, 2005;
- [32] Stefano Donatello, Analisi e retrofitting di ponti e viadotti esistenti, Università degli Studi di Udine (2016);
- [33] Bruno Godart, Loïc Divet, Lessons learned from structures damaged by delayed ettringite formation and the French prevention strategy, Fifth international conference on Forensic Engineering, Institution of Civil Engineers, Apr 2013, France. 12p. ffhal-00945667f.
- [34] ENCO Engineering Concrete, *Gelo e disgelo del calcestruzzo*, #ABC del calcestruzzo, https://www.encosrl.it/gelo-disgelo-del-calcestruzzo/;
- [35] Edoardo Mocco, Pavimentazioni esterne di calcestruzzo: degrado da gelo-disgelo, 24/10/2015, Azichem, <u>https://www.azichem.it/news/pavimentazioni-esterne-di-calcestruzzo-degrado-da-gelo-disgelo/200/;</u>
- [36] GeoMEB S.r.1.s. Indagini ambientali Progetti per l'ingegneria ambientale e idraulica analisi su materiali e beni culturali, *Indagini termografiche*, <u>http://geomebsrls.weebly.com/indaginitermografiche.html</u>;
- [37] ISTEMI Diagnostica per l'Ingegneria, l'Ambiente ed i Beni Culturali, Misura della profondità di carbonatazione, Prove chimiche sui materiali, <u>http://www.istemi.it/prodotto/prove-chimiche-</u> <u>sui-materiali/misura-della-profondita%E2%80%99-di-</u> carbonatazione/5c0c5be6d14772f5b67020d6ad08f8f3;
- [38] DISMAT Laboratorio per la Sperimentazione sulle Strutture e sui Materiali da costruzione, Prove di Caratterizzazione Dinamiche su Strutture, <u>https://dismat.it/ambiti-operativi/prove-di-</u>

caratterizzazione-dinamica/prove-di-caratterizzazione-dinamiche-sustrutture/7,1864807,1067784;

- [39] Edoardo Mocco, Carbonatazione e corrosione del conglomerato cementizio armato, 10/03/2015, Azichem, <u>https://www.azichem.it/news/carbonatazione-e-corrosione-del-</u> conglomerato-cementizio-armato/170/;
- [40] Marco Piacenti, Cosa fa crepare il calcestruzzo?, 05/02/2017, SOS BUILDINGS, http://sosbuildings.altervista.org/cosa-fa-crepare-il-calcestruzzo/.

Allegati

# Inquadramento sito





# Identificazione travi prelevate dal cavalcavia

# Identificazione travi in sito



	10
Dipartimento di	Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale
Corso di la	urea magistrale in Ingegneria Civile
	residua
Elaborato	Inquadramento sito e identificazione travi
OITO I	This Deleteenelegies Mirefleri
SHU	TNE- Polo technicylco miralion
SITU SCALA PIANTA SITO	1:000
STTU SCALA PIANTA SITO SCALA PIANTA CAVALCAVIA	1:80
STIU SCALA PIANTA SITO SCALA PIANTA CAVALCAVIA SCALA DETTAGLIO PIANTA	11NE- Polo techologico minanon 1:000 120
STITU SCALA PIANTA SITO SCALA PIANTA CANAUCAVIA SCALA DETTAGLIO PIANTA SCALA SEZIONI	1 NE- P010 1800 000 000 minanon 1:000 1:00 1:00 1:00
STIU SCALA PIANTA SITO SCALA PIANTA CANALCAVA SCALA DETTAGLIO PIANTA SCALA SEZIONI Tesista:	1200 1200 1200 1200 1200 1200 1200 1200
SCALA PIANTA SITO SCALA PIANTA SCALA PIANTA SCALA DETTAGLO PIANTA SCALA SEZIONI Tesista: Luciano d'Elia	1300 1300 1300 1300 130 130 130 Relatore: Francesco Tondol
STIC SCALA PIANTA CANALCAVIA SCALA AUNTA CANALCAVIA SCALA SEZONI Tesista: Luciano d'Elia	1900 Techologico minanon 1900 1900 1900 1900 1900 1900 1900 190





127_T9-P48/P49E	Fesura 1   Post 1 Description   1 20 40   1 20 40   1 20 40   1 20 40   1 20 40   1 20 40   1 20 40   1 20 50   1 10 15 20   1 10 15 70   1 20 100 51   1 10 15 70   10 15 20 100   11 20 00 100   10 15 20 100   10 15 20 100   10 15 20 100   10 15 20 100   10 10 10 100   10 10 10 100   10 10 10 100
	130_T9-P48/P49O 129_T9-P48/P49O
	128_T9-P48/P49O
5 ↓ Rong 1,2,5 Pressura 7 0 C	
Introde Titlede Titlede Program in Approximation <t< th=""><th></th></t<>	
B= 60 cm B= 60 cm H= 19 cm H= 19 cm H= 17 cm	Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale Corso di laurea magistrale in Ingegneria Civile Elementi in calcestruzzo armato precompresso: rillevo dei danneggiamenti e stima della capacità residua DIRAVE Trave 19-P48/P49 SITO TNE: Polo tecnologico Mirafiori ocutaristrate 160 socia Approsentti 110 Tesista: Relatore: Luciano d'Ella Francesco Tondolo
	Pierclaudio Savino



Testata Nord (sito)







Apertura [mm]









#### Testata Sud (sito)

59,5

Testata Nord (sito)



0.5" - 7 fili

LEGENDA

Danneggiamento

da sollevamento 🛛 Delaminazione Espulsione copriferro

Armatura esposta -Fessurazione Trefoli danneggiati





Fessura 1 O

Testate Dila	T6-P48/P49			
49	Numero progressiva	Progressiva [cm]	Apertura [mm]	
	1	0.0	0.2	
	2	2.0	0.1	
	3	4.0	0.1	
	4	6.0	0.2	
	5	8.0	0.3	
	6	10.0	0.3	
	7	12.0	0.2	
	8	14.0	0.2	
	9	16.0	0.1	
	10	18.0	0.2	
	11	20.0	0.1	
	12	22.0	0.2	
Fessura 1	18	24.0	0.1	
	14	26.0	0.1	
	16	28.0	0.1	
	16	30.0	0.3	
	17	32.0	0.2	
	18	34.0	0.2	
	19	35.0	0.1	
	20	38.0	0.1	
	21	40.0	0.2	
	22	42.0	0.2	
	23	44.0	0.1	
	24	45.0	0.1	
	25	48.0	0.1	
	26	50.0	0.1	
	27	62.0	0.1	
	28	54.0	0.1	
	29	55.0	0.2	








59,5













LEGENDA Danneggiamento da sollevamento Delaminazione Espulsione copriferro - Armatura esposta -Fessurazione Trefoli danneggiati



Testata Sud (sito)







Testata Nord (sito)





	NULL Commence and the second	the second second second	and the second
	Profondità=12 cm	Est	Profondità=9 cm
<u>ם</u> ("ו	Ŵ	Profondità=11 cm 🔛	Ŵ
้ร		Profondità=6 cm	
13	Profondità=3 cm	Ovest	Profondità=6 cm
54.001.0076277			



Sud



Testata Sud (sito)







Testata Nord (sito)







174\_T3-P46/P470

Testata Nord (sito)





Intradosso

173\_T3-P46/P470

0	T3-P46/P47				
Ovest	Numero progressiva	Progressiva [cm]	Apertura [mm]		
	1	0.0	0.1		
	2	2.0	0.2		
	3	4.0	0.6		
	4	8.C	0.9		
	5	8.0	1.2		
	6	10.0	2.0		
	7	12.0	2.0		
Hessura 1	8	14.0	0.1		
	9	16.0	0.4		
	10	18 D	0.4		
	11	20.0	0.6		
	12	22.0	2.0		
	13	24.0	2.5		
		00.0	0.0		











	ressur	2 4	
	•		
.		T2-P46/P47	
1	Numero progressiva	Progressiva [cm]	Apertura [mm]
	1	0.0	2.0
. [	2	2.0	2.0
'	8	4.0	7.0
- 1		6.0	2.0



Fessura 2						
• <b>-</b>						
Breenette		T2-P46/P47				
Est	Numero progressiva	Progressiva [cm]	Apertura [mm]			
	1	0.0	0.1			
	2	2.D	D 1			
	3	4.0	0.2			
	4	8.0	0.2			
	5	8 D	0.2			
	6	10.0	0.2			
	7	12.0	0.5			
	8	14.0	0.3			
	Ð	16.0	0.1			
	1D	18.0	D 1			
	11	20.0	0.2			
	12	22.0	0.1			
	13	24.0	D 1			
	14	26.0	0.2			
Fessura 2	15	28.0	0.2			
	15	30.0	0.1			
	17	32.0	0.2			
	1B	34.0	D 2			
	19	36.0	0.2			
	20	30.0	0.1			
	21	40.0	D 1			
	22	42.0	0.1			
	23	44.0	0.1			
	24	46.0	D.1			
	25	46.0	0.1			
	28	50.0	D 1			
	27	52.0	D.1			
	28	54.0	0.1			
	29	56 D	D 1			

	T2-P46/P47			
sso -	Numero progressiva	Progressiva [cm]	Apertura [mm]	
	1	0.0	2.5	
Ī	2	2.0	2.5	
Ī	3	4.0	2.5	
Ī	4	6.0	2.5	
Ī	5	8.0	2.4	
Fessura	8	10.0	2.0	
7	7	12.0	1.5	
1	8	14.0	1.5	
ī	Ŷ	16.0	1.0	
1	10	18.D	0.8	
1	11	20.0	0.6	
1	12	22.0	0.8	

Prometto	T2-P46/P47			
Ovest	Numero progressiva	Progressiva [cm]	Apertura [mm]	
	1	0.0	4.0	
	2	2.0	4.0	
	3	4.0	8.0	
	4	8.0	5.0	
	5	8.0	7.0	
	5	10.0	8.0	
	7	12.0	8.0	
	8	14.0	ВO	
	9	18.0	9.0	
	10	18 G	10.0	
	11	20.0	10 D	
	12	22.0	11.0	
	13	24.0	11.0	
	14	26.0	10.0	
	15	20.0	11.0	
	16	30.0	14 D	
	17	32.0	14.D	
	18	34.0	14.0	
Hessard 5	19	36 D	20.D	
	20	38.0	13.0	
	21	40.0	20.0	
	22	42.0	22.0	
	23	44.0	17.0	
	24	46.0	13 D	
	25	48.0	16 D	
	28	50.0	14 D	
	27	52 D	19 D	
	28	64.0	6.0	
	29	56.0	4.0	
	30	58 D	7.0	
	31	60.0	4.0	
	32	62.0	B 0	
	33	64.0	8.0	
	34	66.0	8.0	
	35	68.0	7.0	
	38	70.0	1.0	





 1. 1.	-
-	
 T	
	1

1 22	T1-P48/P47			
Est	Numero progressiva	Progressiva [cm]	Apertura [mm]	
	1	0.0	7.8	
	2	20	8.0	
	3	40	8.0	
	4	еa	85	
	5	8.0	5.6	
	6	10.0	10.0	
	7	12.0	7.0	
	9	14.C	1.5	
essuita (	9	16 C	1.0	
	°0	18.C	1.0	
	11	20.0	0.6	
	-2	22.0	0.6	
	- 3	24.0	0.3	
	14	26.0	0.3	
	16	28.0	0.2	
	8	30.0	0.1	













		-	-)	1	
1700	 			- +1	











TO Logo



Sud B=67 cm B=66 cm B=67 cm B=66 cm B=66 cm B=65 cm B=65 cm B=64 cm B=63 cm B=63 cm B=62 cm B=62 cm B=61 cm B=61 cm B=61 cm B=50 c

0.5" - 7 fili

46 Numero Progressiva [cm] [mm]

Fessura 5

Apertura [mm]

4.0

•

Testata Pila 46 Numero progressiva [cm]

7 8 9 10

Testata Pila 46 Numero progressiva [cm]

Fessura 6

°

Fessura 6 1 0.0 ----

Testata Nord (sito)

Testata Pila Progressiva Progressiva [cm] [mm]

9

12.0 14.0 18.0 18.0

24.0 26.0

Fessura 4

Numero Progressiva Apertura progressiva [cm] [mm]

 3
 4.0
 0.7

 4
 6.0
 0.7

 5
 3.0
 1.0

 6
 10.0
 0.4

 7
 12.0
 0.1

Testata Pila 45



E Fesura 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2		Frank 2         Frank       Topology         1       1         2       1         3       4         4       1         2       1         3       4         4       1         1       1 <tr td=""> <t< th=""></t<></tr> <tr><th></th><th></th><th>199_T5-P46/P47O</th></tr> <tr><th></th><th></th><th>198_T5-P46/P47O</th></tr> <tr><th>9 Fe</th><th>ssura 7 Fessura</th><th>ð</th></tr> <tr><th>Openant         Aperlyin         Present         Present         Present           0.0         0.1         1         1         1           0.0         0.1         1         1         1           0.0         0.1         1         3         6         1           0.0         0.1         1         1         1         1         1           0.0         0.1         1</th><th>Present         Average         Present         Average           0         0         0         0           200         0         0         0           200         0         0         0           200         0         0         0           200         0         0         0           400         0         0         0           000         0         0         0           100         10         0         0           100         15         0         0           100         0         0         0           100         0         0         0           100         0         0         0           100         0         0         0           200         10         0         0           200         10         0         0           200         10         0         0           200         10         0         0           200         10         0         0           200         10         0         0           200         10         0     <th>Hether         Apprication           000         0.2           000         0.2           000         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.4           800         0.4           800         0.4           800         0.4</th></th></tr> <tr><th>Fessura 7 2</th><th></th><th>Total         Total         <th< th=""></th<></th></tr> <tr><th>50 cm B= 52 cm B= 57 15 cm H= 16 cm H= 17</th><th>6         100           0         100</th><th>Dipartimento di Ingegneria Civile, Edle ed Ambientale Corso di laurea magistrale in Ingegneria Civile Elementi in calcestruzzo armato precompresso: rillevo dei danneggiamenti e stima della capacità residua DI TRAVE Trave T5-P47//P46 SITO TNE-Polo tecnologico Mirafiori soci.a resolariti 110 Interista: Relatore: Luciano d'Elia Francesco Tondolo Correlatore Pierclaudio Savino</th></tr>			199_T5-P46/P47O			198_T5-P46/P47O	9 Fe	ssura 7 Fessura	ð	Openant         Aperlyin         Present         Present         Present           0.0         0.1         1         1         1           0.0         0.1         1         1         1           0.0         0.1         1         3         6         1           0.0         0.1         1         1         1         1         1           0.0         0.1         1	Present         Average         Present         Average           0         0         0         0           200         0         0         0           200         0         0         0           200         0         0         0           200         0         0         0           400         0         0         0           000         0         0         0           100         10         0         0           100         15         0         0           100         0         0         0           100         0         0         0           100         0         0         0           100         0         0         0           200         10         0         0           200         10         0         0           200         10         0         0           200         10         0         0           200         10         0         0           200         10         0         0           200         10         0 <th>Hether         Apprication           000         0.2           000         0.2           000         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.4           800         0.4           800         0.4           800         0.4</th>	Hether         Apprication           000         0.2           000         0.2           000         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.4           800         0.4           800         0.4           800         0.4	Fessura 7 2		Total         Total <th< th=""></th<>	50 cm B= 52 cm B= 57 15 cm H= 16 cm H= 17	6         100           0         100	Dipartimento di Ingegneria Civile, Edle ed Ambientale Corso di laurea magistrale in Ingegneria Civile Elementi in calcestruzzo armato precompresso: rillevo dei danneggiamenti e stima della capacità residua DI TRAVE Trave T5-P47//P46 SITO TNE-Polo tecnologico Mirafiori soci.a resolariti 110 Interista: Relatore: Luciano d'Elia Francesco Tondolo Correlatore Pierclaudio Savino
		199_T5-P46/P47O																		
		198_T5-P46/P47O																		
9 Fe	ssura 7 Fessura	ð																		
Openant         Aperlyin         Present         Present         Present           0.0         0.1         1         1         1           0.0         0.1         1         1         1           0.0         0.1         1         3         6         1           0.0         0.1         1         1         1         1         1           0.0         0.1         1	Present         Average         Present         Average           0         0         0         0           200         0         0         0           200         0         0         0           200         0         0         0           200         0         0         0           400         0         0         0           000         0         0         0           100         10         0         0           100         15         0         0           100         0         0         0           100         0         0         0           100         0         0         0           100         0         0         0           200         10         0         0           200         10         0         0           200         10         0         0           200         10         0         0           200         10         0         0           200         10         0         0           200         10         0 <th>Hether         Apprication           000         0.2           000         0.2           000         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.4           800         0.4           800         0.4           800         0.4</th>	Hether         Apprication           000         0.2           000         0.2           000         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.2           800         0.4           800         0.4           800         0.4           800         0.4																		
Fessura 7 2		Total         Total <th< th=""></th<>																		
50 cm B= 52 cm B= 57 15 cm H= 16 cm H= 17	6         100           0         100	Dipartimento di Ingegneria Civile, Edle ed Ambientale Corso di laurea magistrale in Ingegneria Civile Elementi in calcestruzzo armato precompresso: rillevo dei danneggiamenti e stima della capacità residua DI TRAVE Trave T5-P47//P46 SITO TNE-Polo tecnologico Mirafiori soci.a resolariti 110 Interista: Relatore: Luciano d'Elia Francesco Tondolo Correlatore Pierclaudio Savino																		





Testata Nord (sito)

۰.

estata Pila 46 Numero progressi va

sura S

T4-P47/P4

Apertura [mm] Progressi [cm]

0.5" - 7 fili



 25
 480
 0.1

 26
 500
 0.1

 27
 520
 0.1

 28
 540
 0.1

20 36.0 0.1 21 40.0 0.1

Intradosso





		-		- indiate	
(Jacobian )	1112				
-	100		-	n	
				10	-
			~	Ĩ	

	-		
		T4-P47/P46	
Est	Numero progressiva	Progressiva [cm]	Apertura [mm]
	1	0.0	1.0
1	2	2.0	2.0
Ĩ	3	4.0	0.4
1	4	6.0	1.0
1	5	0.8	0.5
	3	10.0	0.3
-ossum	7	12.0	0.4
	8	14.0	0.1
	9	16.0	0.1
- 1	10	18.0	0.1
Ī	11	20.0	0.1
1	12	22.0	0.1







	Fessura 6			
	T4-P47/P46			
Ovest	Numero progressiva	Progressiva [cm]	Aperture [mm]	
	1	0.0	0.8	
	2	20	0.5	
	3	40	C 7	
Fessura 6	4	5.0	1.0	
	- 5	8.0	0.5	
	e	10.0	C 2	
	7	120	0.6	

Fessura 5

0

Numero



Prospetto Ovest (sito)

216\_T8-P46/P47E

216\_T8-P46/P47E





0.5" - 7 fili



.30

215\_T8-P46/P47E

215\_T8-P46/P47E

Dies.

Intradosso

LEGENDA
Danneggiamento
da sollevamento
Delaminazione
Espulsione copriferro
Armatura esposta
-Fessurazione



1	1.4	1
-24	-	F
		]
D	a	

	Fessura 1				
Description		T9-P47/P46			
Est	Numero progressiva	Progressiva [cm]	Apertura [mm]		
	1	0.0	0.1		
	2	2.0	0.2		
	3	4.0	0.1		
Fessure 1	- 4	6.0	0.1		
	5	8.0	0.2		
	8	10.0	0.2		
	7	12.0	02		



	Fes O	sura 6	
		TB-P47/P46	
Ovest	Numero progressiva	Progressiva [cm]	Apertura [mm]
	1	0.0	0.1
	2	2.0	0.1
	3	4.0	0.1
Fessura 6	4	6.0	0.1
	5	6.0	0.1
	8	10.0	0.1

	°	(	
		TB-P47/P45	
Ovest	Numero progressiva	Progressiva [cm]	Apertura [mm]
	1	0.0	0.1
	2	2.0	0.1
	3	4.0	0.1
	4	6.0	0.1
	5	6.0	0.2
	8	10.0	0.2
	7	12.0	0.3
Fession 1	8	14.0	0.4
	э	16.0	0.2
	10	18.0	0.1
	- 11	20.0	0.1
	12	22.0	0.1
	13	24.0	0.1
	14	26.0	0.1

#### Testata Sud (sito)

8

59,5









0.5" - 7 fili





LEGENDA Danneggiamento da sollevamento Delaminazione Espulsione copriferro Armatura esposta Fessurazione



-	-	and the second	-	and the second
No.	COMPANY OF	ALCONOMIC	- interest	to the second
				1.18
				The second
			1	N.L.
State of the	-	STREET, ON THE	ALC: NO	1.1
		_		
		T		
		T		



	Fes O	sura 1	
		T9-P47/P46	
\$50	Numero progressiva	Progressiva [cm]	Apertura [mm]
	1	0.0	0.15
essura	2	2.0	0.20
1	3	4.0	0.30
	4	6.D	0.25



### Testata Sud (sito)

59,5





Prospetto Ovest (sito)





0.5" - 7 fili



Intradosso Est Sud 314 5 Ovest Fessura 4 Fessura 1 Fessura 3 Fessura 5 Fessura 6 Fessura T10-SPJP47 Progressiva [cm] 0.0 T10-SPIP47 Progressiv [cm] 0.0 Intrado sso Numero progressiva Intrado sso 
 T10.SPIPAT
 Apertura [cm]
 Apertura [mm]

 0.0
 0.15

 2.0
 0.20

 4.0
 0.15

 6.0
 0.15

 0.0
 0.15
 Intrado SSO Intrado SEO Numero progressiva Apertura [mm] 010 Numero progressiva Numero Progress [cm] T10-SPIP47 Progressiva (cm) Intrado SSO Numero Progressiva Apertura progressiva (cm) (nm) [mm 0.15 Intrado sso Numero progressiva Apertura [mm] Soletta Sud B=50 cm B=57 cm B=59 cm B=59 cm B=58 cm B=50 cm B=60 cm B=60 cm B=60 cm B=60 cm B=60 cm B=8 cm B=80 cm B=81 cm B=81 cm B=81 cm B=81 cm B=81 cm B=81 cm B=17 cm H=18 cm H=18 cm H=18 cm H=18 cm H=19 cm H=19 cm H=19 cm H=12 1 cm H=18 cm H=18 cm H=18 cm H=18 cm H=18 cm H=18 cm H=19 cm H=19 cm H=21 cm H=18 cm H=18 cm H=18 cm H=18 cm H=18 cm H=19 cm H=19 cm H=18 cm H=18 cm H=18 cm H=18 cm H=18 cm H=19 cm H=19 cm H=18 cm H=18 cm H=18 cm H=18 cm H=18 cm H=18 cm H=19 cm H=19 cm H=18 cm H=18 cm H=18 cm H=18 cm H=18 cm H=19 cm H=18 cm H=18

LEGENDA Danneggiamento da sollevamento Delaminazione

Espulsione copriferro – Armatura esposta -Fessurazione Trefoli danneggiati

in the			
			-
		1000	1000
A R	100	219	100
		2.11	
		A	-









### Testata Sud (sito)







Prospetto Ovest (sito)



Testata Nord (sito)





LEGENDA Danneggiamento da sollevamento Delaminazione Espulsione copriferro - Armatura esposta -Fessurazione Trefoli danneggiati c

Intradosso









	8
Dipartimento	o di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale
Corso di laure	a magistrale in Ingegneria Civile
Element	i in calcestruzzo armato o: rilievo dei danneggiamenti e
stima	della capacità residua
ID TRAVE	della capacità residua Trave T9-SP/P47
stima ID TRAVE SITO	della capacità residua Trave T9-SP/P47 TNE- Polo tecnologico Mirafiori
SITO SCALA DESIGNATION	della capacità residua Trave T9-SP/P47 TNE- Polo tecnologico Mirafiori 1:50 1:100







Testata Nord (sito)





LEGENDA Danneggiamento da sollevamento 🛛 Delaminazione Espulsione copriferro Armatura esposta -Fessurazione













2.	- in in the
and the second of the second of the second s	
	×.

### Testata Sud (sito)







## Prospetto Ovest (sito)



## Testata Nord (sito)







#### LEGENDA Danneggiamento da sollevamento Delaminazione Espulsione copriferro Armatura esposta -Fessurazione



Intradosso











Correlatore: Pierclaudio Savino











LEGENDA Danneggiamento da sollevamento Delaminazione Espulsione copriferro Armatura esposta -Fessurazione

	-	-		T.
-	19-1-	-	-	
				and the second
	ſ	-		-

		10-361641		
Ovest	Numero progressiva	Progressiva [cm]	Apertura (mm)	
	2	2.0	0.1	
	3	40 60	0.1	
	6	8.0	0.1	
	6	10.0	0.1	
	8	14.0	0.1	
	9	16.0	0.1	
	10	20.0	0.1	
	12	22.0	0.1	
	- 13	28.0	0.1	
	15	28 C	D.1	
	-7	32.0	0.1	
Fessura 2	18	34.0	0.1	
	19	38.0	0.1	
	21	40.0	D.1	
	22	41.0	0.1	
	24	45.0	0.1	
	25	48.0	0.1	
	27	62.0	0.1	
	28	54.0 55.0	0.1	
	30	68.0	0.1	
	31	60.0	D.1	
	32	61.0	0.1	
	34	66.0	0.1	
	Di Cors prece	partimento so di laurea Elementi mpresso	di Ingeç Ambi in calce rillevo	preria Civile, Edile er entale rale in Ingegneria Ch setruzzo armato dei danneggjament

Francesco Tondolo



Nord

Correlatore: Pierclaudio Savino



Sud

Testata Nord (sito)

LEGENDA
Danneggiamento
da sollevamento
Delaminazione
Espulsione copriferro
Armatura esposta

- Fessurazione

Trefoli danneggiati 59,5

Prospetto Ovest (sito)



Intradosso













Prospetto Ovest (sito)



Intradosso



Soletta Sud B=d3 cm B=d3 c

# Testata Nord (sito)



LEGENDA Danneggiamento da sollevamento Delaminazione Espulsione copriferre – Armatura esposta - Fessurazione Trefoli danneggiati c

-	-	-	14	1	5
			-	· H	-
			10000	No.	
-	-		174	Contain or	
-	disa di	17	17		
- Handle	and a		17.		
-			1		

Fessura
-
-

Deservite		T3-SPIP47	
Est	Numero progressiva	Progressiva (cm)	Apertura [mm]
	1	0.0	0.1
	2	2.0	0.1
l î	3	40	0.1
1	4	6.0	0.1
	5	8.0	0.1
Fessure 1	6	10.0	0.1
	7	12.0	0.1
l i	8	14.0	0.1
1	g.	16.0	0.1
i i	10	18.0	0.1
i i	11	20.0	0.1







				-	
	-	-	E		
1000					
				1	





![](_page_129_Picture_1.jpeg)

![](_page_130_Figure_0.jpeg)

![](_page_131_Figure_0.jpeg)

![](_page_132_Figure_0.jpeg)

![](_page_132_Figure_1.jpeg)

![](_page_132_Figure_2.jpeg)

essu	ra 5
0.	
	1

Fessu
0.
1

 Prospe	
 Prospe	
 Prospe	
Prospe	 

progressiva	femi	fuuui
1	0	0.1
2	2	D.1
3	4	0.1
4	6	0.1
5	8	0.1
6	10	0.1
7	12	D.1
8	14	0.2
9	16	0.2
10	18	0.5
11	20	0.1
12	22	0.1
10	24	- 0.4

Ovest	progressiva	[cm]	[mm]
		0	0.1
	2	2	0.9
	3	4	0.6
	4	6	0.6
	5	8	0.8
	6	10	1.2
	7	12	1.5
	8	14	23
0004.0.0	9	16	0.0
	10	18	1.6
	11	20	3.1
	12	22	12
	13	24	0.5
	14	28	0.5
	15	23	0.3
	16	- 30	0.1

	Fess	ura 6
	0	1
		C1-SP/P48
Prospetto Ovest	Numero progressiva	C1-SP/P48 Progressiva [cm]
Prospetto Ovest	Numero progressiva	C1-SP/P48 Progressiv [cm] C

		C	0.5
	2	2	0.5
Forma	3	4	1.1
1055200	4	6	0.5
	5	8	0.4
- E	6	10	0.2

![](_page_133_Figure_0.jpeg)

				0	Fessur	a 10			9		
Prometto		Pulvino 49	_	÷-	-			Prospetto		Pulvino 49	
Est	Numero progressiva	Progressiva [cm]	Apertura [mm]	Prospetto	Numere	Pulvino 49 Progressiva	Apertura	Est	progressiva	Progressiva [cm]	Apertura (mm)
-	1 2	0	0.3		progressiva.	[cm]	[mm]		2	2	0.10
	3	4	0.5		2	2	0.7		3	4	0.10
	6	8	0.4		4	- 4	1.5		5	å	0.10
	6	10	0.3		6	3	80		6 7	10	0.10
	8	14	0.5		7	12	0.2		8	14	0.10
	9	15	1.0		8	14	0.3		g 10	18	0.10
	11	20	0.7		10	18	0.5		11	20	0.15
-	12	22	0.3		11	20	0.8		12	22	0.10
	14	24	0.5		13	24	0.7		14	26	0.25
	15	20	0.2		14	28	0.1		10	28	0.15
	17	32	0.4		16	31	1.7		17	32	0.10
Fetsura 5	18	34	0.4		17	32	0.1	Fessure 12	18	36	0.25
	20	38	0.4		19	35	0.1		20	38	0.30
	21	40	0.3		20	40	0.1		22	42	0.20
-	23	- 44	0.1		22	42	0.1		23	44	0.10
	.04 25	48	0.1	Second 10	24	46	0.1		25	40	0.20
	28	50	0.3	casa in re	25	<0	0.0		26	50 52	0.20
	28	54	0.5		20	52	0.8		20	54	0.10
	29	56	0.4		28	54	0.8		29	56	0.10
	30	60	0.2		20	51	chius		31	60	0.10
-	32	62	0.1		31	30	chiuse		32	62	0.20
	34	66	0.1		30	34	chiuse		34	66	0.35
-	35	68	0.1		34	35	chiuse E 1		35	70	0.20
	37	72	0.1		38	38	0.1				
					37	71	0.1				
					09	75	0.1				
					41	78	0.1				
					42	81	0.1				
					43	05	0.1				
					46	07 89	0.1				
					47	£1	D.1				
		Fessur	a 15		10	Fessura 1	6		Fes	sura 17	
		•				°			•	-	
Pro	spetto Est Nur	Pulvin nero Prog	o 49 ressiva Apert	ura Prospe	tto Numero	Pulvino 49 Progress	iva Apertura	Prospetto	Numero	Pulvino 49 Progressiva	Apertu
	progr	essiva L	0 0.1	<u>.</u>	progress 1	va [cm] े	0.20		progressiva 1	. [em] 0	0.15
-		2	2 0.1	Peopura	16 2	2	0.26	-	2	2	0.10
		4	6 0.1		4	\$	0.10	1	4	6	0.15
Fes	suna 15	5	6 0.2 10 0.1	5					5	8	0.40
									6	10	
		7	12 0.1	5				Fessura 17	7	10	0.50
	_	7 8 9	12 0.1 14 0.2 16 0.1	5 D				Fessura 17	6 7 8 9	10 12 14 16	0.50
		9	12 0.1 14 0.2 16 0.1	5 0				Fessura 17	6 7 9 10	10 12 14 16 18 20	0.50 0.10 0.50 0.25 0.25 0.30
		7 8 9	12 0.1 14 0.2 16 0.1	5				Fessura 17	6 7 8 9 10 11 12 13	10 12 14 16 18 20 22	0.50 0.10 0.50 0.25 0.25 0.30 0.60 1.00
		7	12 0.1 14 0.2 16 0.1	5				Feesura 17	6 7 8 10 11 12 13	10 12 14 16 18 30 22 24	0.50 0.10 0.50 0.25 0.30 0.60 1.00
		7	12 0.1 14 0.2 16 0.1	0				Eesara 17	6 7 8 9 10 11 12 13	10 12 14 16 19 20 20 22 24	0.50 0.10 0.55 0.25 0.30 0.60 1.00
Fessu	m 2	7 8	12 0.11 14 0.2 16 0.1	Fessur	na 3			Fetaura 17	8 9 10 11 12 13 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	10 12 14 16 10 20 22 22 24	0.50 0.10 0.50 0.25 0.30 0.80 1.00
Fessu Vumero ogressiva	ra 2 Putvino 49 Progressiva [cm]	Apertura [mm1]	Prospetto Overt	Fessur Numero progrestive	a 3 Putvino 49 Progressiva [em]	Apertura [mm]	Prospetto Ovest	Fet	6 7 8 9 10 11 12 13 13 5 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	10 12 14 16 10 22 22 24 24	0.550
Fessu Fessu Numero rogressiva	ra 2 Protyno 49 Protyno sta [cm]	7 8 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	12 0.11 14 0.2 10 0.1	Fessur Pessur Progressive progressive	a 3 Pulvino 40 Progressina [on] 0	Apertura [mm] 0.15	Prospetto Ovest	Fet	0         7           8         0           10         11           12         12           13         13	10         12           14         16           16         22           24         24	0.50 0.70 0.55 0.35 0.30 0.80 1.00
Fessur Fassur Numero ograsiva 1 2 8	ra 2 Právine 49 Progressiva [em] 0 2 4	7 8 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	12 0.11 14 0.22 10 0.11	Fessur Numero progressive 1 2 3	Pulsino 48 Progressiva [on] 2 4	Apertura (me) 0.15 0.25	Prospetto Ovest	Fetsura 17	6         7           8         9           10         11           11         12           12         13   Patrimo 40 Popretsiv Pop	10         12           14         16           20         22           24         24	0.50 0.79 0.25 0.32 0.30 0.00 100
Fessu Fessu T T T S A 4	ra 2 Province 49 Progressiva Cemi 2 2 4 6 6	Apertura           0           0           0.60           2.00           1.50	12 0.11 14 0.2 10 0.1 10 0.1	Fessur Dumero prograstra 1 2 3 4	Putvino 48 Progressiva [em] 0 2 4 6 0	Apertura (mm) 0.15 0.25 0.35 0.35	Prospetto Ovest	Fetsura 12	6 7 8 9 10 11 12 13 13 8 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 10 11 12 13 13 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	va Apertura (mm) 0.12 20 20 24 24 24	0.50 0.79 0.25 0.30 0.80 100
Fessu I Numero ogreenbva 1 2 3 4 5 6	ra 2 Progressiva [cm] 0 2 2 4 6 8 8 70	7 8 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	12         0.1           14         0.2           10         0.1           10         0.1           10         0.1           10         0.1           10         0.1           10         0.1           11         0.1           12         0.1           12         0.1           12         0.1           12         0.1           12         0.1           12         0.1           12         0.1           12         0.1           12         0.1           12         0.1           13         0.1           14         0.1           15         0.1           16         0.1           17         0.1           18         0.1           19         0.1           10         0.1           10         0.1           10         0.1           10         0.1           10         0.1           10         0.1           10         0.1           10         0.1	Fessur Numero progrestra 1 2 3 4 4 5 6	a 3 Paying 49 Progressing [om] 0 2 2 4 6 6 8 10	Apertura [mm] 0.15 0.25 0.25 0.35 0.35	Prospetto Ovest	Fetsura 12	6 7 8 9 10 11 12 13 13 8 9 9 10 11 12 13 13 9 9 9 10 11 12 13 9 9 10 11 12 13 9 9 10 11 12 13 9 9 10 11 11 2 13 9 9 9 10 10 11 11 2 13 9 9 9 10 11 11 12 13 9 9 9 10 11 11 12 13 9 9 9 10 11 11 12 13 9 9 9 10 11 11 12 13 9 9 9 10 11 11 12 13 9 9 9 10 11 11 12 13 9 9 9 10 11 11 12 13 9 9 9 9 10 11 11 12 13 9 9 9 10 11 11 12 13 13 10 10 11 11 12 13 13 10 10 11 11 12 13 13 13 10 10 11 11 12 13 13 10 10 11 11 13 13 11 11 13 11 11 13 11 11 11	10           12           14           16           20           21           22           24           25           24           25           24           25           25           250           260           250           250	0.50 0.79 0.25 0.30 0.80 100
Fessu Vurrero ogreenbva 1 2 3 3 4 4 5 6 6 7 8	Partino 49 Progressiva Cent 0 2 4 6 8 70 72 6 6 6 8 70 72 6 6 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	7 8 9 9 9 0 80 2 00 0 50 0 50 0 50 0 50 0 50 0 50	Prospetto Prospe	5 2 3 5 5 5 6 7 1 2 5 6 7 7 1 1 2 5 5 6 7 7 1 1 2 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	a 3 Putvino 48 Progressiva [em] 0 0 2 4 6 8 8 10 17 17	Apertura (fmnt) 0.15 0.22 0.35 0.35 0.35 0.35	Prospetto Ovest	Fetsura 12	6 7 8 9 10 11 12 13 13 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	10         12           14         16           10         20           21         24           22         24           23         24           20         24           20         24           21         24           22         24           23         255           255         255           255         255           255         255           255         255	0.50 0.00 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25
Fessu 1 1 3 4 5 0 7 8 9	ra 2 Promo 49 Progressiva (cm) 2 2 4 6 8 5 7 2 4 6 8 5 7 2 4 4 5 7 5 7 5 7 5 7 6	7 8 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	12         0.1           14         0.2           10         0.1           10         0.1           10         0.1           10         0.1           11         0.2           12         0.1           12         0.1           12         0.1           12         0.1           12         0.1           12         0.1           12         0.1           12         0.1           12         0.1           12         0.1           12         0.1           12         0.1           13         0.1           14         0.2           15         0.1           14         0.2           15         0.1           14         0.2           15         0.1           16         0.1           17         0.1           16         0.1           17         0.1           16         0.1           17         0.1           16         0.1           17         0.1	E 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	Pd vino 48 Progressiva [on] 0 2 4 6 8 10 12 14 16	Agertura (mrs) 0.15 0.25 0.25 0.25 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35	Prospetto Ovist	Fetsura 17	6 7 8 9 10 11 12 13 5 5 5 5 5 5 6 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	10           12           14           16           12           24           22           24           25           26           27           28           29           29           20           21           22           24	0.50 0.00 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25
Feessure 1 2 8 4 4 5 0 0 7 8 9 10 11	ra 2 Progressiva (cm) 0 0 2 2 4 6 0 8 8 70 72 4 6 0 8 8 70 72 74 74 70 77	7 8 9 9 9 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	12         0.1           14         0.2           10         0.1           11         0.2           12         0.1           12         0.1           12         0.1           12         0.1           12         0.1           12         0.1           12         0.1           12         0.1           12         0.1           12         0.1           12         0.1           12         0.1           12         0.1           12         0.1           12         0.1           13         0.1           14         0.2           15         0.1           14         0.2           15         0.1           14         0.2           15         0.1           14         0.2           15         0.1           16         0.1           17         0.1           16         0.1           17         0.1           16         0.1           17         0.1	Fessur 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	na 3 Progression [em] 0 0 2 4 6 10 10 10 11 14 14 14 16 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	Apertura [0:07] 0.015 0.025 0.035 0.035 0.035 0.035 0.035 0.035 0.035 0.035 0.035	Prospeto Overt	Feesura 17	6         7           7         8           9         10           11         12           13         13	<ul> <li>10</li> <li>12</li> <li>14</li> <li>10</li> <li>20</li> <li>22</li> <li>24</li> </ul>	0.50 0.50 0.55 0.35 0.35 0.35 0.400 1.00
Fessus ₹ 1 2 3 4 5 5 6 7 8 9 10 11	ra 2 Potvine 40 Progressiva (cm) 0 2 4 6 8 10 52 4 10 10 12 4 16 10 12 12 12 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	7 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	12         0.1           14         0.2           10         0.1           10         0.1	5 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	a 3 Professiona (m) 2 4 6 5 10 12 14 16 16 10 12 14 16 10 20 22 22	Appending 1015 1	Prospetto Overt	Feesan 17	6 7 8 9 10 11 12 13 8 8 9 10 11 12 13 8 8 9 9 10 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	-0         -12           -12         -12	0.50 0.50 0.55 0.35 0.30 0.00 1.00
Fessue 1 2 3 4 5 0 7 8 9 10 11	ra 2 Progressiva [cm] 0 2 3 4 6 8 - - - - - - - - - - - - - - - - - -	7 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	12 0.0 14 0.2 10 0.3 10 0.3 10 0.3	5 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	<b>2 3 3</b>	Append 10 01 02 02 02 02 02 02 02 02 02 02	Prospeta Overat	Feetan 12	6 7 8 1 9 10 11 12 13 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	Image: constraint of the second sec	0.50 0.70 0.25 0.25 0.25 0.23 0.23 0.23 0.23 0.23 0.23 0.23 0.23
Feesu Feesu F	7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	7 8 9 9 9 1 1 1 1 2 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	12 0.0 1 14 0.2 1 16 0.3 1 17 octave 3 17 octave 3 1	E 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	BAND 88 Projection 89 Control 100 Control	Apenan Penin DE 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5	Prospett Creat	Feetum 12	6 7 7 8 9 10 10 11 12 12 13 13 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	0         0           12         12           14         6           2         2           2         2           2         2           2         2           2         2           2         2           2         2           2         2           2         2           3         2           3         2           3         2           3         2           3         3	0.50
Fessus ↓ ↓ Numero ogressiva 1 2 3 4 5 5 0 7 7 8 9 10 11	7 7 7 2 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	γ         β           9         -           9         -           9         -           9         -           9         -           9         -           9         -           9         -           9         -           9         -           9         -           0         -	12 0.0 14 0.2 16 0.3 17 00000 16 0.3 17 00000 00000 00000 00000 00000 00000 0000	E 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	BAND 48 Programmer 48 6 6 6 7 4 4 8 8 7 7 4 4 8 8 7 7 4 4 8 8 7 7 4 8 8 8 7 7 8 7 8	Appendi Intelligional DEC 0.55 0.55 0.55 0.55 0.55 0.55 0.55 0.5	Prospetb Overt	Feetum 12	6 7 7 8 9 10 10 11 12 12 13 13 13 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14	10         0           12         12           14         16           10         23           28         24           29         24           20         24           20         23           21         24           21         24           22         24           23         23           24         23           25         24           20         23           300         39           300         30           300         30           300         30           300         30           300         30           300         30           300         30           300         30           300         30           300         30           300         30           300         30           300         30           300         30           300         30           300         30           300         30           300         30 <t< td=""><td>0.50</td></t<>	0.50
Fessu ↓ 1 2 8 - - - - - - - - - - - - -	7a 2 7Varine 40 700 70 70 70 70 70 70 70 70 70 70 70 7	F         F           9         -         -           9         -         -         -           9         -         -         -         -           9         -         -         -         -         -           9         -	12 0.0 1 14 0.2 1 16 0.1 1 17 0000 0 0001 	2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	a 3 Printer di Frogeneric (en) 6 8 8 12 4 10 22 22 22 23 23 20 22 22 22 22 22 22 22 22 22	Apertian 0.05 0.85 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.2	Prospetts Overst Fortca 19 4	Peter Prove Pr	6 7 8 9 10 11 12 13 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8	Image: region of the system         The system           1         1         1           1         1         1         1           1         1         1         1         1           2         2         2         2         2         2           2	
Fessus **********************************	Ta 2	Γ         Γ           9         -	Propetto Pro	Feesus 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	a 3 Putro 48 Progeniu (m) 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	Apertura (mm) 0.15 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.2	Prospet	Feeturn 12	6 7 8 9 10 11 12 13 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	10         12           12         22           20         22           21         24           22         24           35         30           36         35           39         39           24         23           39         39           39         <	0.50 0.00 0.50 0.50 0.20 0.20 0.20 0.20
Fessus ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓	78 2 71 Article 40 72 Article 40 73 Article 40 74 74 75 74 75 75 74 75 75 75 75 75 75 75 75 75 75 75 75 75	7 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	12         0.1           14         0.2           16         0.1           17         0.1           Ovel         0.1	2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	a 3 Putro d0 Frogram Gen C C C C C C C C C	Agertaa 0.05 0.05 0.25 0.25 0.25 0.55 0.55 0.55	Prospeta Overat	Fee	5         7           8         7           9         0           10         12           13         12           13         13	10	10000000000000000000000000000000000000
Fessure F	7 a 2 7 Junio 40 7 (const) 7 (const)	Γ         Γ           9         -	12 0.0 1 14 0.2 1 16 0.1 1 17 essus 5 17 essus 5	2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	■ 3 Purine dil Portini Portini Portini Portini 0 2 4 0 0 2 2 4 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Appendix 1           mm1           0.5 <td>Prop/till Overst Force 19 4</td> <td>Feetan 12</td> <td>6 7 8 1 9 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1</td> <td>0         0           12         2           24         0           20         22           21         22           22         22           23         22           24         22           25         23           26         25           202         23           303         30           309         309           200         30     <td>USD 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10</td></td>	Prop/till Overst Force 19 4	Feetan 12	6 7 8 1 9 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	0         0           12         2           24         0           20         22           21         22           22         22           23         22           24         22           25         23           26         25           202         23           303         30           309         309           200         30 <td>USD 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10</td>	USD 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10
Fessul Fessul F 1 2 3 4 9 0 7 8 9 10 11	PLATE 00	γ         β           9         -           9         -           9         -           9         -           9         -           9         -           9         -           9         -           9         -           9         -           0         -           0         -           0         -           0         -           0         -           0         -           0         -           0         -           0         -           0         -           0         -           0         -           0         -           0         -           0         -           0         -           0         -           0         -	12 0.0 1 14 0.2 1 15 0.3 1 16 0.3 1 17 0 0 0 0 1 17 0 0 0 0 0 1 17 0 0 0 0 0 0 1 17 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 17 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Fessure     Former     Forme	Butino 49 Progretaria 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Appendix           0.25	Properties of the second secon	Feetum 12	6         7           8         7           9         10           12         12           13         3           source 4           Posses           6         6           7         74           6         8           7         74           8         7           7         74           8         7           7         74           4         2           8         7           7         74           8         7           7         7           7         7           8         7           9         2           10         7           11         7           12         12           13         12           14         12           15         12           16         12           17         14           18         12           19         12           10         12           10         12 <td< td=""><td>Image: Control of the section of the sectio</td><td>10000000000000000000000000000000000000</td></td<>	Image: Control of the section of the sectio	10000000000000000000000000000000000000
Fessu ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓	Plane al Plane al	7 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	Prospetto Prospe	Fessur Pressur Program 1 1 2 3 4 4 5 5 6 7 7 8 9 9 10 11 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15	B 3	Aperture           0.15           0.25	Prospeta Const Potos is 4	Feetum 12	6 7 7 8 9 9 10 11 12 13 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	Image: second	10000 100000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 1
Fessu ↑ 1 2 3 4 5 0 0 10 11 11	7a 2 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	F         F           0         -         -           0         -         -         -           0         -         -         -         -           0         -         -         -         -         -           0         -	12         0.1           14         0.2           16         0.1           Prospito         Ovet	2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	a 3 Putro 40 Progenit  Constraints  Progenit  Constraints  Progenit  Constraints  Progenit  Progenit Progen	Apertua Apertua 0.15 0.25 0.35	Forces to 4	Feetum 12 Feetum	6         7           8         7           9         0           11         12           13         13	Image: second	0.959 0.919 0.929 0.925 0.
Feessure           1           2           4           5           6           7           6           11	7 a 2 7 Junio 40 7 Control 40 7 Junio 4	Apertura         0           0         0           0         0           0         0           0         0           0         0           0         0           0         0           0         0           0         0           0         0           0         0           0         0           0         0           0         0           0         0           0         0	12         0.1           14         0.2           15         0.1           16         0.1           17         esture 3           17         esture 3           17         esture 3           16         esture 3	2     2     2     2     2     2     2     2     4     7	■ 3  Protect dia	Appendix           mm1           0.5           0.6           0.75           0.75           0.75           0.75           0.75           0.75           0.75           0.75           0.75           0.75           0.75           0.75           0.75 </td <td>Forspetts</td> <td>Feetum 12</td> <td>6         7           8         0           10         11           12         13</td> <td>0         0           12         2           24         2           25         2           24         2           25         2           26         2           27         2           28         2           29         2           20         2           20         2           20         2           30         30           300         30           300         30           20         3           20         3           300         30           300         30           300         30           20         3           20         3           20         3           20         3           20         3           20         3           20         3           20         3           20         3           21         0           40         0           40         0           40         0           40         0</td> <td>1000 100 1000 1</td>	Forspetts	Feetum 12	6         7           8         0           10         11           12         13	0         0           12         2           24         2           25         2           24         2           25         2           26         2           27         2           28         2           29         2           20         2           20         2           20         2           30         30           300         30           300         30           20         3           20         3           300         30           300         30           300         30           20         3           20         3           20         3           20         3           20         3           20         3           20         3           20         3           20         3           21         0           40         0           40         0           40         0           40         0	1000 100 1000 1
Pessul 1 2 8 4 9 0 7 8 9 10 11	7 7 7 2 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	7 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	12         0.1           14         0.2           16         0.3           16         0.3	E 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	Butino 8 Projection 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Appendix           0.15           0.25           0.25           0.25           0.25           0.25           0.25           0.25           0.25           0.25           0.25           0.25           0.25           0.25           0.25           0.25           0.26           0.2760           0.255           0.260           0.2760	Properties of the second secon	Feetum 12	6         7           8         9           10         11           12         12           13         13           Based of the second of the	Image: second	10.550 10.50 1
Fessu ↑ 1 1 2 2 3 3 5 5 0 7 7 8 9 10 11 11	Putritis 40 Progressing 2 2 4 6 6 6 7 7 7 7 4 4 6 6 8 2 2 4 4 6 8 2 2 2 4 4 6 8 2 2 2	7 8 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	Prospetto Techura 3	E 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	Total Control 4           Program           0           0           0           4           8           10           22           23           24           10           25           23           24           10           23           24           10	Apertury           0.05	Formed Properties of the Prope	Feeturn 12	5 7 7 8 9 9 9 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	Image: second	0.550 0.700 0.527 0.302 0.525 0.300 0.525 0.300 0.400 1.000 1.000 1.000 1.55 1.55 1.55 1.55
Fessu ↓ 1 2 3 4 5 5 9 10 11	7a 2 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	Apertura           0           0           0	12         0.1           14         0.2           16         0.1           Prospito         0           Ovel         0           Prospito         0	2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	a 3 Putro d0 Projection 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Apertual (1997) (1997) (199	Forces of d	Feeture 12	6 5 7 8 9 10 11 12 13 12 13 13 12 13 13 12 13 13 12 13 13 13 13 14 12 13 13 14 12 13 15 15 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16	Image: constraint of the second sec	0.555 0.500 0.525 0.300 0.525 0.300 0.525 0.300 0.525 0.300 0.555 0.300 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.000000
Feeseu Feeseu 1 2 3 4 5 5 6 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	<b>Trans 2</b>	Apertura           0         -	12         0.1           14         0.2           15         0.1           16         0.1           17         Return 3           17         Return 3           1         Return 3           1         Return 3           1         Return 3	E 2 2 2 2 5 5 6 7 7 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8	■ 3  Protect of the second se	Appendix           March 10           0.05 </td <td>Prospeta           Fects: 0.4           Fects: 0.4</td> <td>Fee  Fee  Fee  Fee  Fee  Fee  Fee  Fee</td> <td>6         7           8         0           10         11           12         13   Sourd 4           Image: Sourd 1         11           12         13   Sourd 4           Image: Sourd 1         11           12         13   Sourd 1           Image: Sourd 1         11           Image: Sourd 1         12           Image: Sourd 1         13           Image: Sourd 1         12           Image: Sourd 1         13           Image: Sourd 1         12           Image: Sourd 1         13           Image: Sourd 1         14</td> <td>Image         Image         <th< td=""><td>0.55 0.1 0.2 0.2 0.2 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3</td></th<></td>	Prospeta           Fects: 0.4           Fects: 0.4	Fee  Fee  Fee  Fee  Fee  Fee  Fee  Fee	6         7           8         0           10         11           12         13   Sourd 4           Image: Sourd 1         11           12         13   Sourd 4           Image: Sourd 1         11           12         13   Sourd 1           Image: Sourd 1         11           Image: Sourd 1         12           Image: Sourd 1         13           Image: Sourd 1         12           Image: Sourd 1         13           Image: Sourd 1         12           Image: Sourd 1         13           Image: Sourd 1         14	Image         Image <th< td=""><td>0.55 0.1 0.2 0.2 0.2 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3</td></th<>	0.55 0.1 0.2 0.2 0.2 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3
Fessu 1 2 8 4 5 5 0 7 8 9 10 11 11 11 11 11 11 11 11 11	7 a 2 7 Autor 40 7 Constant 7 Constant	Γ         Γ           9         -           9         -           9         -           0         -	12         0.1           14         0.2           16         0.3           16         0.3	E 2 2 2 2 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	a 3  Putro 8  Progentia   0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0	Appendix           Immini           DEC           DEC </td <td>Propella Over</td> <td>Feetum 12</td> <td>5 5 7 8 9 9 10 10 11 11 1</td> <td>Image: 100 million         Image: 100 million         Image:</td> <td></td>	Propella Over	Feetum 12	5 5 7 8 9 9 10 10 11 11 1	Image: 100 million         Image:	

![](_page_133_Figure_2.jpeg)

![](_page_134_Figure_0.jpeg)

613\_P48E 618\_P48E 617\_P48E 625\_P48E 617\_P48E 625\_P48E 613\_P48E 613\_P48E 618\_P48E

![](_page_134_Figure_2.jpeg)

![](_page_134_Figure_3.jpeg)

Prospetto Ovest (sito)

![](_page_134_Figure_5.jpeg)

![](_page_134_Figure_6.jpeg)

Testata Nord (sito)

![](_page_134_Figure_8.jpeg)

![](_page_134_Figure_9.jpeg)

![](_page_134_Figure_10.jpeg)

#### Intradosso

![](_page_134_Figure_12.jpeg)

Fessura 7 O			
Prospetto Est	Numero	Pulvino 48 Progressiva	Apertura
	progressiva	[cm]	[mm]
-		0	U.Z
	2	2	0.2
	3	4	0.3
	4	6	0.3
	5	8	0.1
5 mm 7	8	10	0.1
i essura r	7	12	0.1
	\$	14	0.1
	÷	16	0.2
	10	18	0.1
	11	20	0.1

Fessura 6			
		Dubring 40	
Prospetto - Est	Numero progressiva	Progressiva [cm]	Apertura (mm)
-	1	0	0.1
	2	2	C.1
	3	4	0.1
	4	6	0.1
	5	8	0.1
	6	10	0.1
Ē	7	12	C.1
Ī	8	14	0.1
-	9	16	0.1
	10	18	0.1
	11	20	0.1
[	12	22	0.2
	13	24	C 1
	14	28	0.1
	15	28	0.6
Fossura 6	16	30	0.1
Ē	17	32	0.1
- I	18	34	0.1
Ĩ	19	35	0.6
Ĩ	20	38	0.4
	21	40	0.3
1	22	42	0.6
	23	44	0.4
-	24	45	0.6
	25	48	C.3
	26	50	C.6
	27	62	C.6
	28	64	C.3
	29	66	0.3
	30	58	C.2
	31	60	0.1

	~ F	essura 8		
	ě 🗕			
		Dubine 49		
Est	Numero progressiva	Progressiva [cm]	Apertura (mm)	
	1	0	D 20	
	2	2	0.15	
	3	4	0.15	
	4	6	0.25	
	5	8	0.15	
	5	10	D 10	
	7	12	0.25	
	6	14	0.15	
	9	16	D 70	
	10	18	0.15	
	11	20	0.15	
	12	22	0.10	
	13	24	0.20	
	14	- 26	D.10	
	15	28	0.10	
	16	30	0.10	
	17	37	0.30	
	18		0.10	
	19	38	0.20	
	20	38	0.10	
	21	40	0.10	
	22	42	D.10	
	23	44	0.10	
	24	-46	0.10	
isura 8	25	48	0.40	
	26	50	0.10	
-	27	52	0.10	
	28	54	0.10	
	29	- 56	0.10	
	50	58	0.10	
	31	60	0.10	
	32	62	0.10	
	33	64	D 20	
	34	66	0.15	
	85	68	0.15	
	38	70	D 15	
	87	72	0.10	
	38	74	0.10	
	39	76	0.10	
t t	-40	78	0.10	
	41	80	0.15	
	-42	82	0.15	
	43	84	0.25	
	-44	86	0.20	
	45	88	0.10	
1	48	90	0.15	
	47	92	0.10	
	48	94	0.10	

![](_page_134_Picture_16.jpeg)

![](_page_134_Figure_17.jpeg)

![](_page_134_Figure_18.jpeg)

![](_page_134_Figure_19.jpeg)

Fessura 7

0	Pulvino 48		
Ovest	Numero progressiva	Progressiva [cm]	Apertura [mm]
	1	0	0.1
	2	2	0.1
	3	4	0.2
	4	6	0.2
	ŭ	8	0.2
	6	10	0.1
	7	12	0.1
Fessura 7	8	14	0.1
	9	15	0.4
	10	18	0.1
	11	20	0.1
	12	22	0.1
	13	24	0.2
	14	26	0.1
	15	20	0.1

Fessura 2

		Pulvino 48	
Ovest	Numero	Progressiva [cm]	Apertura
	progressiva	[cin]	0.2
	2	2	0.7
	1	4	0.9
	4	-7	0.1
	5	8	0.2
	6	10	0.5
	7	12	10
	8	14	12
	9	16	0.8
	10	18	0.6
	1:	20	0.2
	12	22	0.1
	15	24	0.2
	14	26	0.9
	15	26	1.0
	16	30	chiusa
	17	12	chiuse
	18	34	chiuse
	19	26	1.1
	30	38	13
	21	40	1.0
	22	42	15
	2.2	44	0.5
	24	-46	1.2
	25	46	0.6
	28	50	0.1
essure 2	27	52	1.1
	28	54	0.1
	29	96	0.2
	30	58	0.6
	31	50	chuse
	32	52	chiusa
	33	54	chuse
	34	56	chiusa
	35	58	0.2
	38	70	0.1
	37	72	0.1
	38	74	0.1
	39	76	0.1
	40	78	0.1
	41	50	0.1
	42	62	0.4
	43	84	0.1
	44	68	0.1
	45	18	0.1
	46	90	0.1
	47	92	0.5
	48	94	0.6
	49	96	0.1
	50	38	0.1
	51	100	0.1
	52	102	0.1
	50	101	

![](_page_134_Picture_24.jpeg)

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Amblentale

Corso di laurea magistrale in Ingegneria Civile Elementi in calcestruzzo armato precompresso: rilievo dei danneggiamenti e stima della capacità residua

 ID PULVINO
 Pulvino 48

 SITO
 TNE- Polo tecnologico Mirafiori

 SCALATESTATE
 150

 SCALATESTATE
 150

Tesista: Luciano d'Elia Relatore: Francesco Tondolo Correlatore:

Correlatore: Pierclaudio Savino