

DATA ISPEZIONE	ELEMENTI ANALIZZATI					
	SPALLE - n.2 elementi					
	DIFETTO	VOTO	UBICAZIONE	ESTENSIONE	NOTE SPEA	NOTE COMMISSIONE
24/01/2011	1 - 04/12/1989	10	1	30		
	2 - 04/12/1989	10	1	20		
20/04/2011	1 - 04/12/1989	10	1	30		
	2 - 04/12/1989	10	1	20		
15/07/2011	1 - Macchie di umidità - Ubicazione: sulla parete spalla lato GE - Estensione: 80%	10	1	30		
	2 - 04/12/1989	10	1	20		
22/08/2011	1 - 15/07/2011	10	1	30		
	2 - 04/12/1989	10	1	20		
02/11/2011	1 - 15/07/2011	10	1	30		
	2 - 04/12/1989	10	1	20		
14/12/2011	1 - 15/07/2011	10	1	30		
	2 - 04/12/1989	10	1	20		
12/03/2012	1 - 15/07/2011	10	1	30		
	2 - 04/12/1989	10	1	20		
10/04/2012	1 - 15/07/2011	10	1	30		
	2 - 04/12/1989	10	1	20		
18/05/2012	1 - 15/07/2011	10	1	30		
	2 - 04/12/1989	10	1	20		
01/08/2012	1 - 15/07/2011	10	1	30		
	2 - Parte ristrutturata - NULLA DA SEGNALARE					
02/10/2012	1 - 15/07/2011	10	1	30		
28/03/2013	1 - 15/07/2011	10	1	30		
28/06/2013	1 - 15/07/2011	10	1	30		
05/09/2013	1 - 15/07/2011	10	1	30		
06/12/2013	1 - 15/07/2011	10	1	30		
20/03/2014	1 - 15/07/2011	10	1	30		
08/05/2014	1 - 15/07/2011	10	1	30		
03/09/2014	1 - 15/07/2011	10	1	30		
25/11/2014	1 - 15/07/2011	10	1	30		
25/02/2015	1 - 15/07/2011	10	1	30		
12/05/2015	1 - 15/07/2011	10	1	30		
17/09/2015	1 - 15/07/2011	10	1	30		
17/11/2015	1 - 15/07/2011	10	1	30		
29/02/2016	1 - 15/07/2011	10	1	30		
30/03/2016	1 - 15/07/2011	10	1	30		
14/06/2016	1 - 15/07/2011	10	1	30		
30/06/2016	1 - 15/07/2011	10	1	30		
11/07/2016	1 - 15/07/2011	10	1	30		
31/08/2016	1 - 15/07/2011	10	1	30		
28/09/2016	1 - 15/07/2011	10	1	30		
28/10/2016	1 - 15/07/2011	10	1	30		
21/03/2017	1 - 15/07/2011	10	1	30		
28/04/2017	1 - 15/07/2011	10	1	30		
01/09/2017	1 - MACCHIE UMIDITA' - PARETE SP.LATO GE - 80% estensione	10	1	40		
24/10/2017	1 - MACCHIE UMIDITA' - PARETE SP.LATO GE - 80% estensione	10	1	80		
19/02/2018	1 - 24/10/2017	10	1	80		IN TUTTO IL 2018 SECONDO SPEA SULLE SPALLE NON EMERGONO CRITICITA' CON VOTO SUPERIORE A 10
27/06/2018	1 - 24/10/2017	10	1	80		

## ANNESSE 2 – RELAZIONE DI SINTESI INDAGINI STRALLI PILE 9-10

Questa Commissione ispettiva ha analizzato approfonditamente le indagini che nel corso degli anni, successivamente alla costruzione dell'opera, sono state eseguite sugli stralli delle pile 9 e 10.

### ESTENSIMETRI

Sono stati utilizzati per stimare:

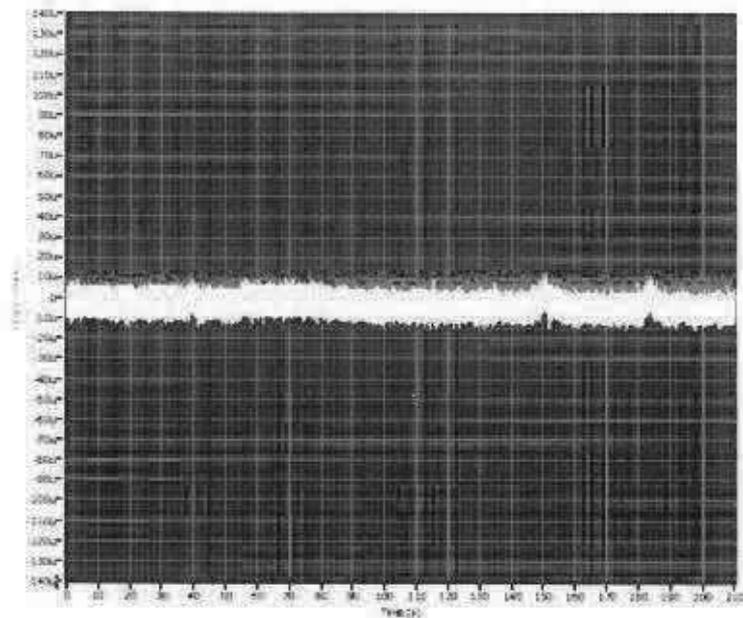
#### Campo di variazione sotto traffico delle tensioni nel cls:

*.....Questa valutazione è stata eseguita mediante l'applicazione di estensimetri resistivi sulla superficie del cls ed il loro collegamento con apposita centralina digitale, che ha permesso di leggere in continuo lo stato deformativo del materiale fissando il valore massimo e quello minimo (eseguite nell'anno 1991 sugli stralli pila n.9 lato Savona e sullo strallo di monte pila n.9 lato Genova, nell'anno 1992 sugli stralli pila n.10 lato mare).....(STR001 – pag.4)*

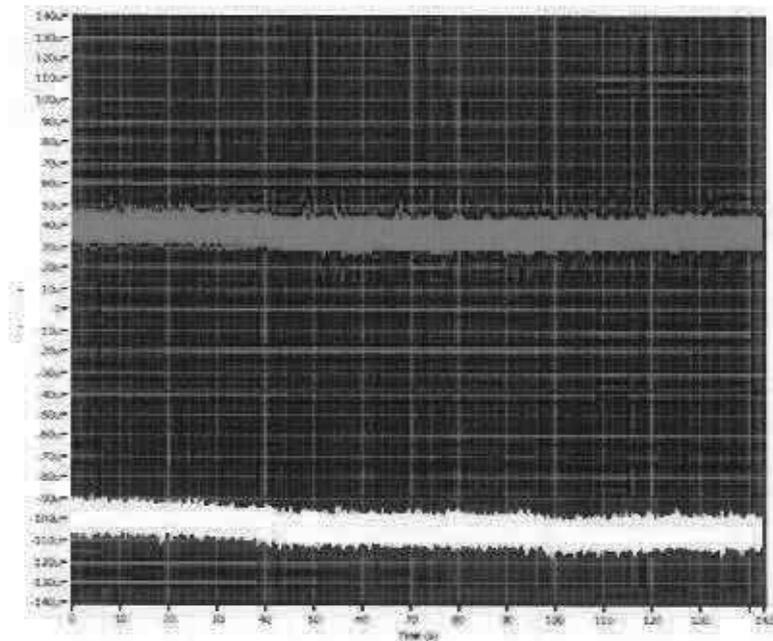
#### Valutazione dello sforzo di precompressione (liberazione delle tensioni):

*...E' stata eseguita una prova di liberazione delle tensioni mediante applicazione di estensimetro resistivo e sua lettura prima e dopo il carotaggio che lo rende indipendente dal resto della struttura (eseguite nell'anno 1991 sugli stralli pila n.9 lato Savona e sullo strallo di monte pila n.9 lato Genova, nell'anno 1992 sugli stralli pila n.10 lato mare).....(STR001 – pag.5)*

Come si può notare dai diagrammi allegati alla relazione "INDAGINI DIAGNOSTICHE SUGLI STRALLI DI PILA 9 E PILA 10", GEN001A pag.18/41, il comportamento rilevato dal sistema di misura estensimetrico è generalmente anomalo e non interpretabile.



*"Di seguito si riporta il diagramma della lettura dopo il taglio.*

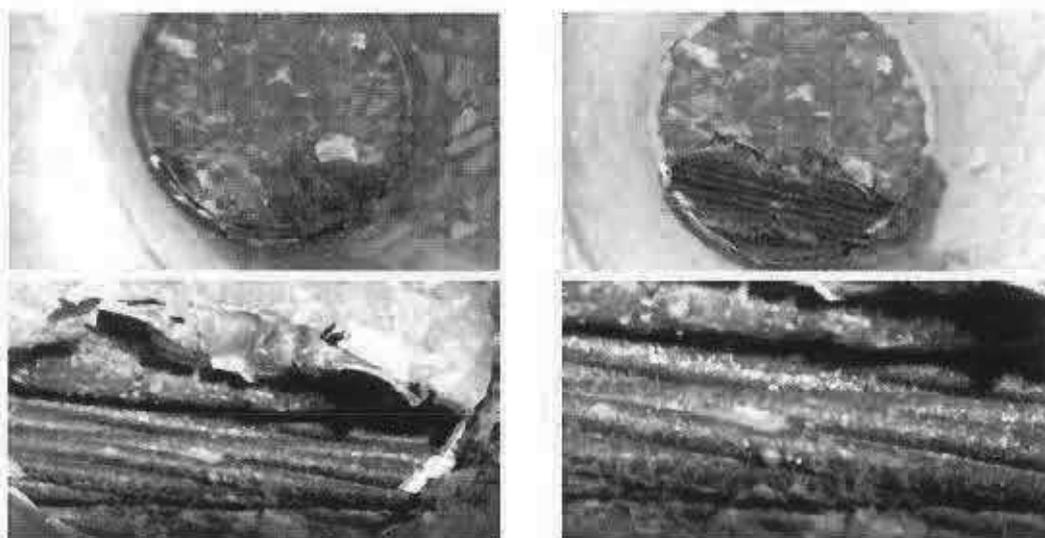


*"Come si nota dai diagrammi il comportamento rilevato dagli estensimetri è stato discorde."*

Una motivazione di ciò può essere ricercata nel fatto che una condizione necessaria per il corretto svolgimento di questa prova sta nel non interrompere l'alimentazione elettrica dei sensori in fase di carotaggio, cosa che nel caso in esame non è avvenuta. Quindi si può concludere dicendo che tali analisi effettuate non fornivano alcun risultato spendibile.

Esame visivo dei cavi di precompressione:

*"(...) Eseguite nell'anno 1991 sugli stralli pila n.9 lato Savona. Nell'anno 1992, sugli stralli pila n.10 lato mare, sono state condotte utilizzando i carotaggi della prova di liberazione delle tensioni, demolizioni locali ed endoscopia (...)"*



A pag.26/41 della relazione allegata alla GEN001A "Indagini diagnostiche sugli stralli di pila9 e pila 10" si legge:

*"Il carotaggio è stato effettuato per una lunghezza di circa 10-11 cm intercettando la guaina di un cavo di precompressione a circa 9 cm di profondità. La guaina del cavo è stata aperta ed è stato eseguito l'esame del cavo stesso (...)"*. Da tale esame è stato possibile ricavare quanto segue:

- *"la guaina è apparsa ossidata;*
- *l'iniezione è assente;*
- *sono stati visti 3 dei 4 trefoli che si muovono con facilità facendo leva con uno scalpello;*
- *i fili dei trefoli sono ossidati"*

Tali osservazioni si possono estendere a quasi la totalità dei saggi effettuati.

#### **valutazione della resistenza a compressione del cls:**

*...E' stata eseguita con pull-out e metodo combinato U.S. e sclerometro e pistola Windsor, eseguito a circa 20cm dagli spigoli per evitare di interferire con l'armatura di precompressione (eseguite nell'anno 1991 sullo strallo di monte pila n.9 lato Genova, nell'anno 2012 pila n.10 lato monte)....(STR001 – pag.5)*

I valori riscontrati per la resistenza del calcestruzzo sembrano essere coerenti con quelli misurati nei provini in sede di collaudo al momento della costruzione del ponte e a quelli delle carote estratte durante le indagini visive.

#### **stato conservativo del cls degli stralli:**

Si cita quanto segue:

*"(...) E' stata eseguita un'ispezione visiva, perforazioni con il trapano (per determinazione della compattezza) misure di velocità ultrasonica per trasparenza, confrontando una zona con cls risonante ad una zona con cls in buono stato di conservazione (eseguite nell'anno 2009 sugli stralli pila n.9 e n.10 lato Mare) (...)"*

Dalla documentazione allegata alla progettazione NON vi è traccia dei risultati di tali indagini.

#### **misure riflettometriche (rilievo di anomalie di corrosione ed iniezione):**

*"(...) Il sistema di sorveglianza prevede la messa sotto osservazione della totalità dei cavi di precompressione degli stralli appartenenti alle pile 9 e 10. I cavi di ogni singolo strallo sono stati strumentati a partire da entrambe le testate al fine di consentire un controllo "affidabile" dei cavi lungo i due rami dello strallo stesso (eseguite negli anni 2003-2006-2009-2013 sugli stralli pile n.9 e n.10 lato valle, negli anni 2004-2008-2010-2012-2014-2017 sugli stralli pile n.9 e n.10 lato monte) (...)" (STR001 – pag.5)*

Le misure sono state eseguite il 2 Aprile 2015 su un totale di 52 (Pila 9) + 52 (Pila 10) cavi di precompressione sottoposti a controllo dal lato Genova e 52 (Pila 9) +52 (Pila 10) cavi dal lato Savona. Le misure in oggetto sono state eseguite dopo la sostituzione degli armadi di ammaraggio del sistema di monitoraggio avvenuta nel 2010.

L'armatura tesa degli stralli delle Pile 9 e 10 consiste in due sistemi di cavi:

- **Cavi di precompressione principali:** 16 cavi da 16 trefoli 8 cavi da 12 trefoli, per un totale di 352 trefoli;
- **Cavi di precompressione secondari:** 28 cavi costituiti da 4 trefoli, per un totale di 112 trefoli.

In particolare, sono stati posti sotto osservazione:

- **n.1 trefolo** per ciascuno dei cavi secondari (numerazione progressiva da 1 a 28);
- **n.2 trefoli** (collegati al medesimo morsetto di misura) per ciascuno dei cavi principali (numerazione doppia, da 29-30 a 75-76).

Occorre evidenziare l'esiguità dei trefoli analizzati all'interno di ogni singolo cavo con quest'analisi. A titolo esemplificativo si riportano i valori analizzati per la pila 9.

<b>CAVI DI PRECOMPRESSIONE PRINCIPALI (pila 9)</b>			
<b>TOT</b>	<b>N° TREFOLI ANALIZZATI</b>	<b>% TREFOLI SUL TOT</b>	<b>% CAVI A GRADO DI CORROSIONE 3</b>
16 (da 16 trefoli) + 8 (da 12 trefoli) = 24 cavi (352 trefoli)	48 (24 cavi)	(24*2)/352 = 13%	17/24 = 71%
<b>CAVI DI PRECOMPRESSIONE SECONDARI (pila9)</b>			
28 (da 4 trefoli) = 112 trefoli	28 (28 cavi)	28/112 = 25%	25/28 = 89%

Il metodo riflettometrico **RIMT®** (*Reflectometric Impulse Measurement Technology*), consiste nella misura delle variazioni di impedenza elettrica presenti lungo l'elemento esaminato, a loro volta associate a variazioni fisiche e geometriche dell'elemento stesso, e fornisce risultati di tipo **QUALITATIVO**, sia sul livello di corrosione che sul grado di iniezione dei cavi.

In relazione alla classificazione tipologica delle anomalie di corrosione ed iniezione si rimanda alle tabelle 1 e 2.

*Tabella 1 - Scala qualitativa delle anomalie di corrosione*

<b>rado</b>	<b>Osservazioni sul segnale RIMT2 (analisi pendenze negative)</b>	<b>Possibili attribuzioni all'elemento in esame</b>	<b>Scala qualitativa e considerazioni</b>
1	Debole variazione dipendenza e/o di scostamento del segnale rispetto a quello teorico pseudo ideale	Perdita della superficie protettiva con presenza di ossidazioni superficiali diffuse	Anomalia lieve, senza riduzione di sezione apprezzabile
2	Lieve variazione di pendenza e/o di scostamento del segnale rispetto a quello teorico pseudo ideale	Presenza di lievi ossidazioni locali con formazione di piccoli crateri in zone diffuse (almeno 7-10 cm)	Anomalia lieve, con ossidazione superficiale. Considerare l'eventualità di un monitoraggio con intervalli di tempo medio-lunghi (1-2 anni)
3	Media variazione di pendenza e/o di scostamento del segnale rispetto a quello teorico pseudo ideale	Presenza di crateri di ossidazione più rilevanti sia in profondità che in estensione	Anomalia media, con una discreta riduzione della sezione utile dell'elemento. Considerare l'eventualità di un monitoraggio con intervalli di
4	Sensibile variazione di pendenza e/o di scostamento del segnale rispetto a quello teorico pseudo	Corrosione diffusa con presenza di "croste" superficiali	Riduzione rilevante della sezione utile dell'elemento. Considerare l'eventualità di una ispezione visiva o di un monitoraggio con intervalli
5	Forte variazione di pendenza e/o di scostamento del segnale rispetto a quello teorico pseudo ideale	Forte corrosione con presenza di "croste" di notevole entità	Riduzione della sezione utile dell'elemento tale da inficiarne la sua funzionalità. Effettuare una urgente ispezione visiva e intervenire con idonee opere di

*Tabella 2 - Scala qualitativa delle anomalie di iniezione*

Grado	Osservazioni sul segnale RIMT2 (analisi pendenze positive)	Possibili attribuzioni all'elemento in esame	Scala qualitativa e considerazioni
1	Debole variazione di pendenza e/o di scostamento del segnale rispetto a quello teorico pseudo ideale	Scollamento o micro-fratturazione dell'iniezione dai trefoli; lieve carenza di iniezione (fino al 10-15%)	Anomalia trascurabile, se non si è in presenza di particolari agenti aggressivi e alla loro possibilità di raggiungere l'elemento
2	Lieve variazione di pendenza e/o di scostamento del segnale rispetto a quello teorico pseudo ideale	Lieve fratturazione dell'iniezione; lieve carenza di iniezione (fino al 20-25%)	Anomalia lieve in relazione alla presenza di particolari agenti aggressivi e alla loro possibilità di raggiungere l'elemento
3	Media variazione di pendenza e/o di scostamento del segnale rispetto a quello teorico pseudo ideale	Apprezzabile fratturazione dell'iniezione; apprezzabile carenza di iniezione (fino al 30-35%);	Anomalia media in relazione alla presenza di particolari agenti aggressivi e alla loro possibilità di raggiungere l'elemento
4	Sensibile variazione di pendenza e/o di scostamento del segnale rispetto a quello teorico pseudo ideale	Importante fratturazione dell'iniezione; importante carenza di iniezione (> 35%)	Anomalia che richiede un pronto intervento di recupero e ripristino dell'elemento
5	Forte variazione di pendenza e/o di scostamento del segnale rispetto a quello teorico pseudo ideale	Assenza della malta di iniezione	Analisi visiva atta a determinare se l'elemento può essere recuperato

A titolo esemplificativo si riportano relativamente al lato monte, quello che risultava essere il più danneggiato:

- le estensioni cumulative percentuali rispetto alla lunghezza dei cavi delle anomalie di corrosione e di iniezione;
- gli istogrammi delle estensioni cumulative percentuali delle anomalie

Tabella 3a - Pila Ø - Estensioni cumulative % delle anomalie

Cavo	Cor 1	Cor 2	Cor 3	Cor 4	Ini 1	Ini 2	Ini 3	Ini 4
1	12%	44%	16%	0%	8%	46%	0%	0%
2	9%	37%	14%	0%	11%	39%	9%	0%
3	4%	50%	13%	0%	8%	41%	18%	0%
4	0%	57%	24%	0%	0%	45%	17%	0%
5	0%	62%	13%	0%	8%	71%	0%	0%
6	0%	77%	9%	0%	9%	57%	9%	0%
7	5%	55%	12%	0%	9%	56%	13%	0%
8	0%	26%	9%	0%	9%	14%	13%	0%
9	0%	42%	26%	0%	5%	53%	11%	0%
10	0%	40%	25%	0%	0%	64%	8%	0%
11	0%	39%	26%	0%	14%	57%	7%	0%
12	15%	24%	6%	0%	8%	10%	12%	0%
13	0%	59%	18%	0%	10%	63%	6%	0%
14	4%	59%	12%	0%	0%	64%	0%	0%
15	4%	55%	10%	0%	0%	59%	0%	0%
16	8%	13%	15%	0%	5%	24%	10%	0%
17	0%	65%	17%	0%	0%	60%	11%	0%
18	0%	50%	22%	0%	0%	52%	6%	0%
19	0%	61%	9%	0%	6%	64%	0%	0%
20	16%	17%	6%	0%	15%	16%	1%	0%
21	0%	66%	15%	0%	0%	71%	0%	0%
22	0%	65%	19%	0%	14%	57%	0%	0%
23	0%	60%	15%	0%	0%	59%	7%	0%
24	0%	63%	12%	0%	8%	56%	0%	0%
25	0%	58%	17%	0%	0%	67%	0%	0%
26	4%	43%	11%	0%	6%	40%	6%	0%
27	0%	51%	21%	0%	9%	63%	0%	0%
28	3%	30%	24%	0%	9%	34%	7%	0%
29-30	0%	63%	12%	0%	0%	70%	10%	0%
31-32	10%	45%	16%	0%	14%	57%	8%	0%
33-34	5%	51%	22%	0%	4%	49%	9%	0%
35-36	5%	45%	20%	0%	5%	68%	0%	0%
37-38	0%	55%	27%	0%	0%	73%	6%	0%
39-40	0%	64%	11%	0%	10%	49%	0%	0%
41-42	0%	51%	21%	0%	0%	51%	15%	0%
43-44	5%	60%	22%	0%	6%	54%	12%	0%
45-46	0%	61%	14%	0%	10%	54%	5%	0%
47-48	0%	69%	10%	0%	10%	58%	6%	0%
49-50	0%	55%	25%	0%	0%	66%	0%	0%
51-52	5%	50%	16%	0%	0%	69%	0%	0%
53-54	4%	50%	17%	3%	12%	45%	9%	0%
55-56	6%	45%	25%	0%	2%	56%	7%	0%
57-58	0%	57%	22%	0%	0%	66%	14%	0%
59-60	0%	69%	6%	0%	0%	62%	12%	0%
61-62	0%	66%	14%	0%	0%	71%	12%	0%
63-64	0%	51%	22%	0%	0%	62%	12%	0%
65-66	0%	50%	16%	0%	0%	62%	7%	0%
67-68	0%	52%	24%	0%	6%	58%	8%	0%
69-70	0%	68%	18%	0%	0%	52%	24%	0%
71-72	0%	46%	23%	0%	0%	58%	15%	0%
73-74	0%	54%	25%	0%	4%	56%	8%	0%
75-76	0%	47%	24%	0%	0%	76%	0%	0%

Tabella 3b - Pila 10 - Estensioni cumulative % delle anomalie

Cavo	Cor 1	Cor 2	Cor 3	Cor 4	Ini 1	Ini 2	Ini 3	Ini 4
1	5%	61%	7%	0%	8%	61%	0%	0%
2	5%	67%	11%	0%	17%	45%	0%	0%
3	0%	58%	21%	0%	0%	67%	0%	0%
4	0%	72%	7%	2%	0%	70%	0%	0%
5	0%	71%	3%	4%	6%	58%	0%	0%
6	2%	62%	16%	0%	15%	54%	0%	0%
7	0%	46%	6%	0%	3%	50%	0%	0%
8	2%	62%	16%	0%	8%	11%	12%	0%
9	0%	46%	6%	0%	5%	67%	0%	0%
10	5%	57%	14%	0%	5%	61%	0%	0%
11	0%	69%	11%	0%	9%	60%	0%	0%
12	14%	28%	5%	0%	7%	20%	9%	0%
13	3%	50%	3%	0%	0%	70%	5%	0%
14	0%	70%	8%	0%	10%	48%	0%	0%
15	0%	49%	22%	4%	14%	46%	5%	0%
16	9%	31%	5%	0%	11%	21%	2%	3%
17	0%	73%	6%	0%	20%	42%	0%	0%
18	0%	59%	13%	0%	7%	60%	6%	0%
19	0%	73%	5%	0%	5%	58%	0%	0%
20	12%	33%	5%	2%	17%	20%	0%	0%
21	0%	59%	13%	0%	8%	66%	0%	0%
22	0%	69%	3%	0%	7%	57%	0%	0%
23	4%	69%	5%	2%	6%	52%	12%	0%
24	0%	64%	0%	2%	8%	64%	0%	0%
25	0%	70%	0%	6%	0%	74%	0%	0%
26	0%	62%	10%	4%	6%	63%	0%	0%
27	6%	39%	14%	6%	14%	30%	0%	0%
28	14%	15%	0%	0%	20%	18%	3%	0%
29-30	0%	71%	0%	0%	17%	67%	0%	0%
31-32	3%	54%	18%	0%	16%	54%	5%	0%
33-34	0%	67%	11%	0%	8%	58%	8%	0%
35-36	10%	65%	11%	0%	19%	53%	0%	0%
37-38	0%	75%	3%	0%	11%	65%	0%	0%
39-40	0%	67%	12%	0%	6%	64%	0%	0%
41-42	0%	57%	13%	4%	9%	72%	0%	0%
43-44	0%	65%	14%	0%	12%	67%	0%	0%
45-46	8%	57%	14%	0%	12%	59%	0%	0%
47-48	5%	69%	7%	0%	9%	60%	0%	0%
49-50	9%	62%	6%	0%	12%	55%	0%	0%
51-52	6%	53%	20%	0%	4%	67%	0%	0%
53-54	0%	63%	12%	0%	28%	44%	0%	0%
55-56	20%	45%	6%	0%	10%	51%	0%	0%
57-58	5%	55%	11%	5%	25%	45%	0%	0%
59-60	0%	63%	6%	0%	0%	54%	11%	0%
61-62	0%	64%	9%	0%	7%	60%	0%	0%
63-64	3%	66%	10%	0%	19%	52%	4%	0%
65-66	4%	58%	9%	0%	14%	43%	0%	0%
67-68	15%	41%	12%	0%	19%	51%	0%	0%
69-70	12%	41%	15%	0%	6%	67%	0%	0%
71-72	5%	59%	11%	0%	9%	68%	0%	0%
73-74	5%	62%	6%	0%	13%	51%	0%	0%
75-76	10%	58%	9%	0%	26%	46%	0%	0%

Figura 1a - Pila 9 - Estensioni cumulative % delle anomalie

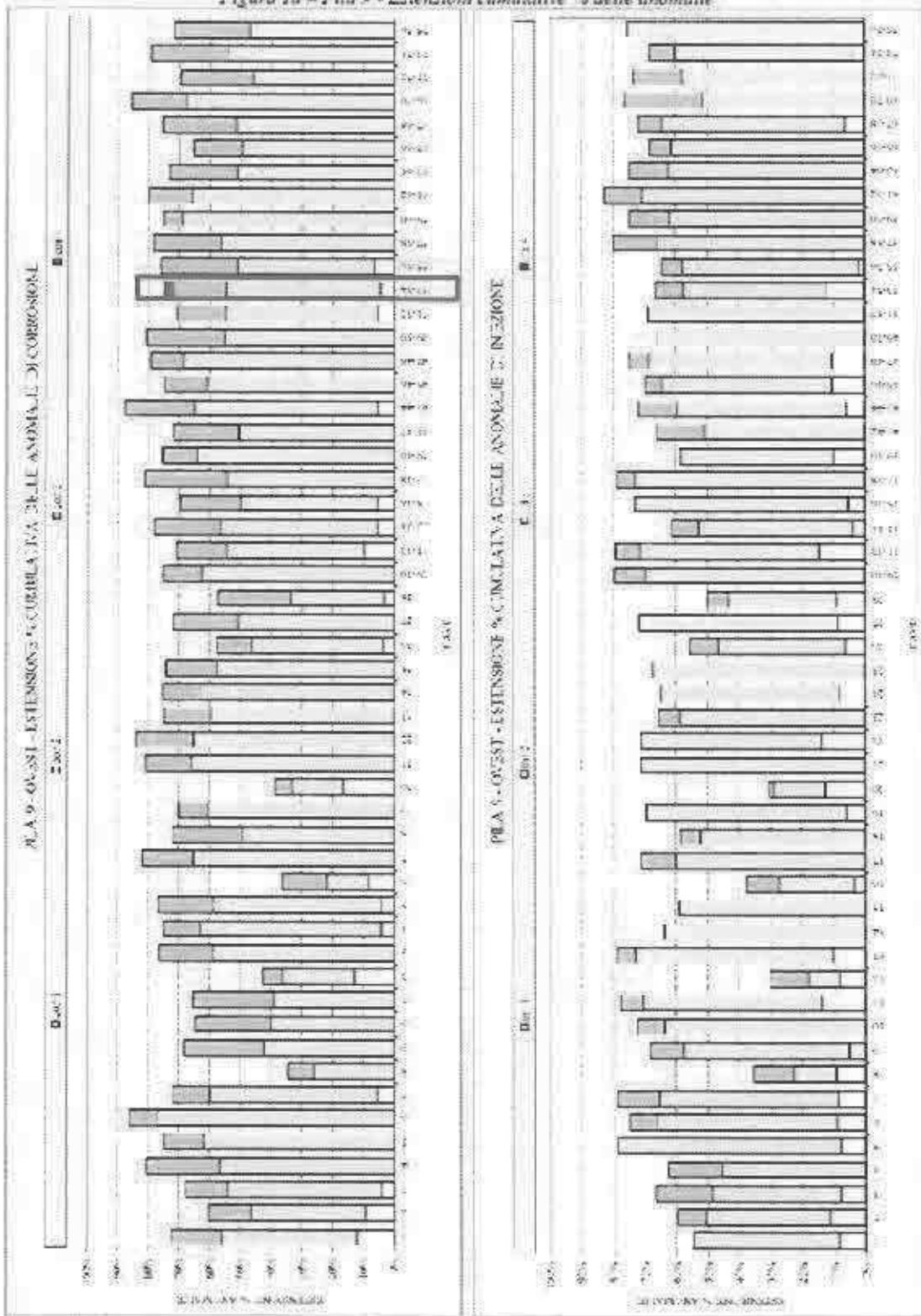
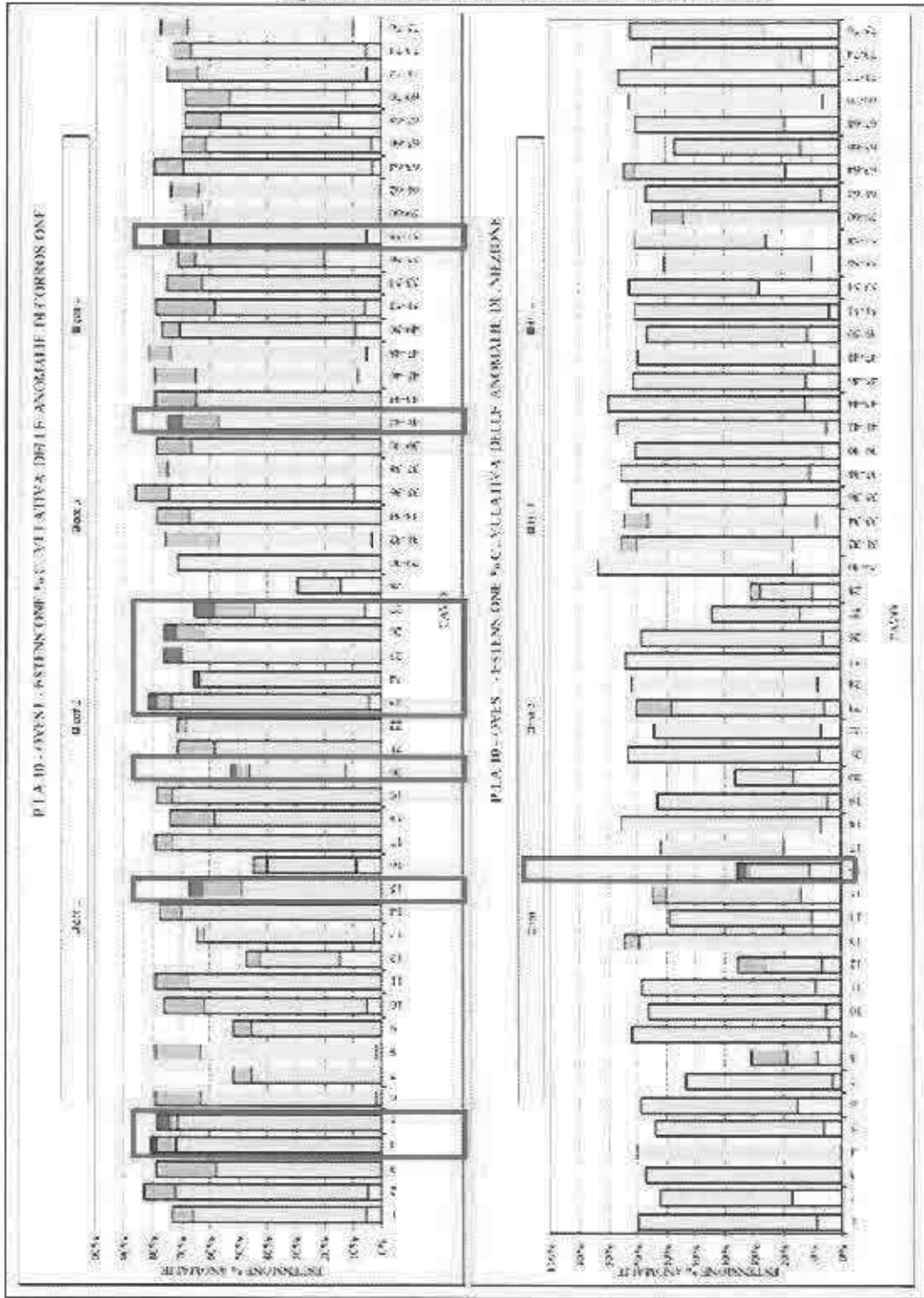


Figura 1b - Fila 10 - Estensioni cumulative % delle anomalie



Occorre sottolineare che fino al 1995 le misure riflettometriche vennero eseguite con una strumentazione ormai obsoleta (RIMT1) rispetto a quella utilizzata nel corso delle ultime letture (RIMT2). In particolare, mentre per le anomalie di iniezione si distingueva esclusivamente l'iniezione parziale (P) dalla iniezione assente (A), i difetti di corrosione erano riferiti alla scala delle anomalie riportata in tabella 4. In tabella 5 si riporta la corrispondenza tra livelli delle anomalie di corrosione tra vecchia e nuova scala.

Tabella 4 - Scala qualitativa delle anomalie di corrosione RIMT1

TIPOLOGIA ANOMALIA	LIVELLO			
	LIV 1	LIV 2	LIV 3	E
	Ossidazione	Corrosione < 10%	Corrosione > 10%	
Fenomeno Diffuso	A Polvere B Croste	C Corrosione diffusa	(C)	
Fenomeno Concentrato	D Pitting	D Pitting	(D)	
Corrosione Fessurante				(E)

Tabella 5 – Corrispondenza tra livelli anomalie corrosione tra vecchia e nuova scala

VECCHIA SCALA (1995)	NUOVA SCALA (2006)
1A	1
1B	2
1D	2
2C	3
2D	3
3	4
E	5

Quindi il concetto evidenziato in relazione generale (GEN001 – pag. 5/53 e 9/53) che:

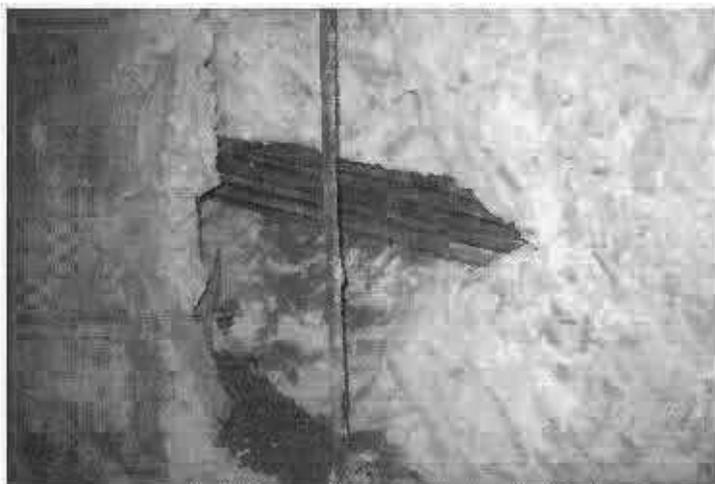
*“Sulla base delle indagini svolte si può stimare cautelativamente un grado di ammaloramento dal 10% al 20%”*

potrebbe ricondursi, a parere della commissione, al confronto fatto tra le tabelle dei due metodi utilizzati negli anni passati, dove il livello di corrosione 3 corrisponde al precedente livello 2C e 2D (corrosione < 10%) e il livello di corrosione 4 corrisponde al precedente livello 3 (corrosione > 10%).

Tale valore ha carattere puramente QUALITATIVO. Nonostante ciò, facendo riferimento alla stessa analisi riflettometrica effettuata per la TRAVE T1 dell'impalcato E11 che collega i sistemi bilanciati 9 e 10, trave lato mare, si rileva, dalle tabelle allegate (Allegato I – Anomalie rilevate – della relazione GEN001A), che per tutti i cavi sottoposti all'esame riflettometrico non viene mai raggiunto un grado di corrosione superiore a 3; nonostante ciò, dai saggi effettuati (pag 433/546 relazione GEN001A – Allegato: INDAGINI

DIAGNOSTICHE SULLE TRAVI DI BORDO ESTERNO IN CAP CARREGGIATA SINISTRA) si evidenzia:

*“Erano visibili circa metà dei fili di ogni cavo, dove i fili sono apparsi fortemente corrosi e ridotti di sezione. In ogni cavo sono stati osservati almeno 4 fili rotti. Nella sezione a circa 6.00 ml dall'appoggio lato Savona è stato nuovamente intercettato il cavo più alto, che si trovava in analogo stato di conservazione. Tutti i fili esaminati risultarono “deformabili” anche solo facendo leva con uno scalpello, e si poté quindi ritenere che fossero “non efficaci”.*



**Foto del 2011**

Questo potrebbe essere indice di una discreta sottostima dei livelli di riduzione della sezione resistente dei cavi rispetto alle % sopra citate (10-20%).

Si può, inoltre, evincere dalle indagini riflettometriche effettuate un graduale evolversi dei fenomeni corrosivi, così come evidenziato a pag.9 della relazione generale allegata al progetto (GEN001) e nella relazione GEN001A.

## ANNESSO 3 – RELAZIONE DI SINTESI INDAGINI E VERIFICHE IMPALCATO

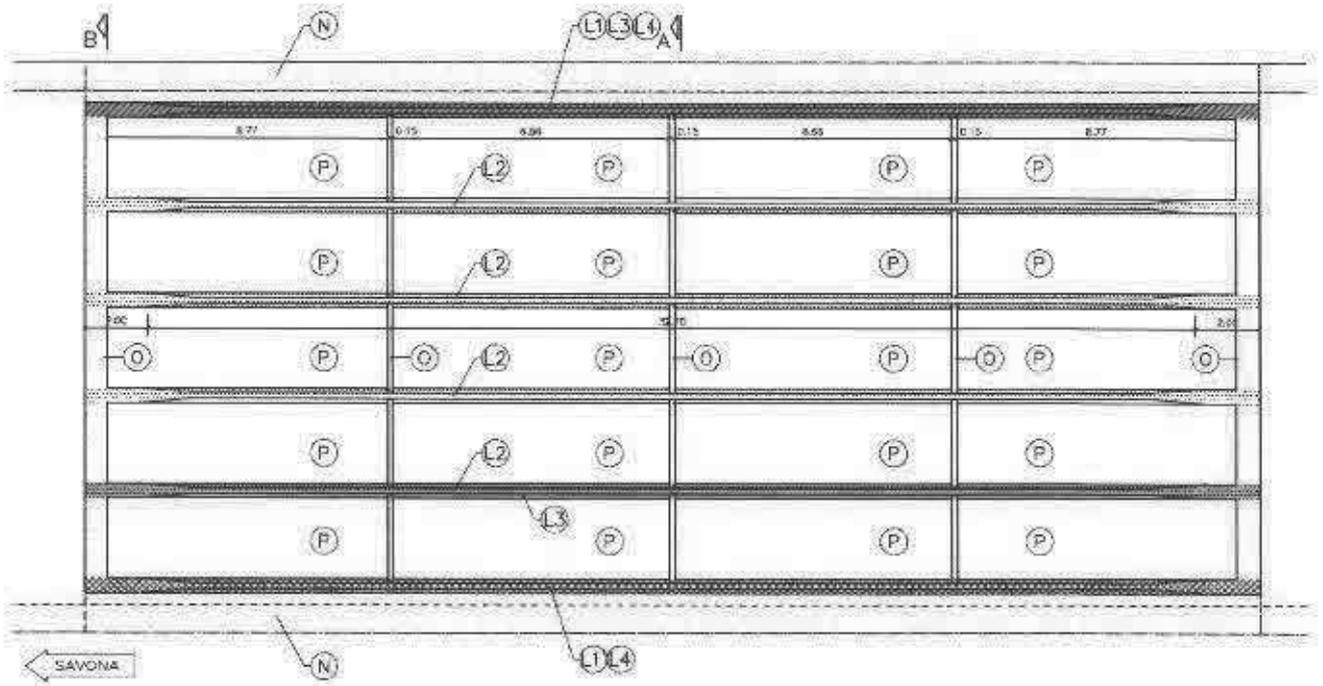
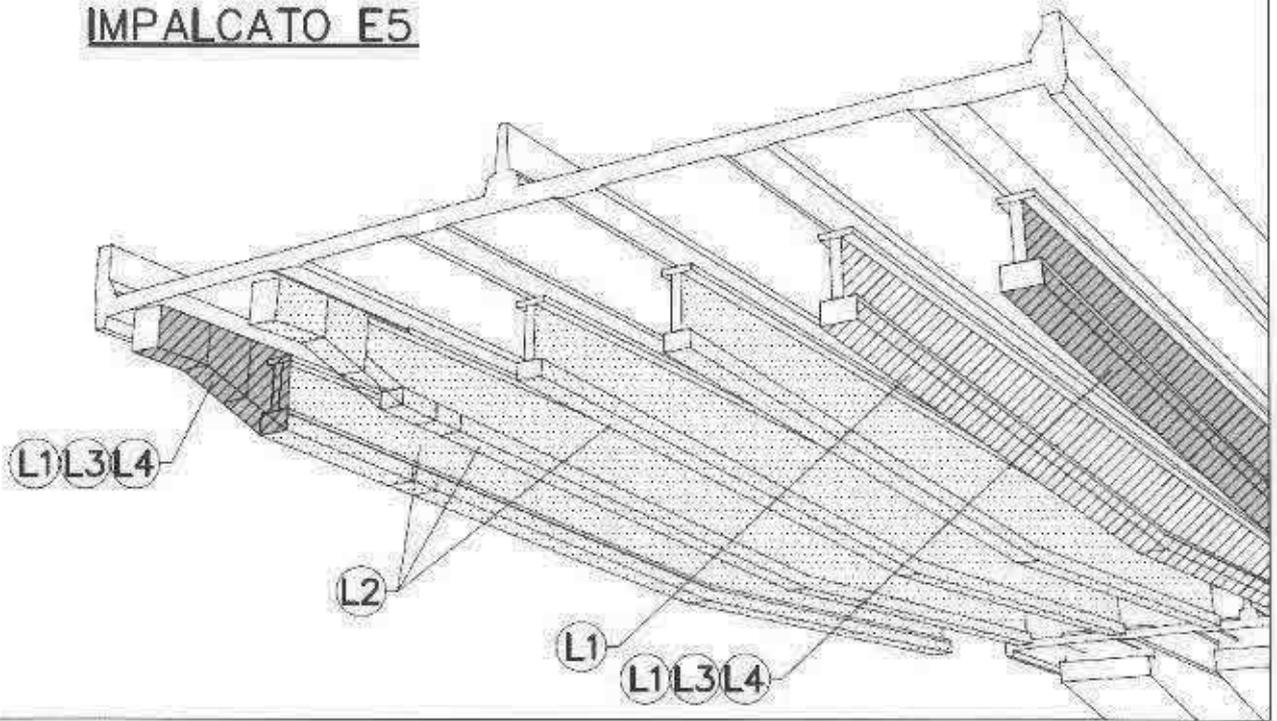
### Introduzione

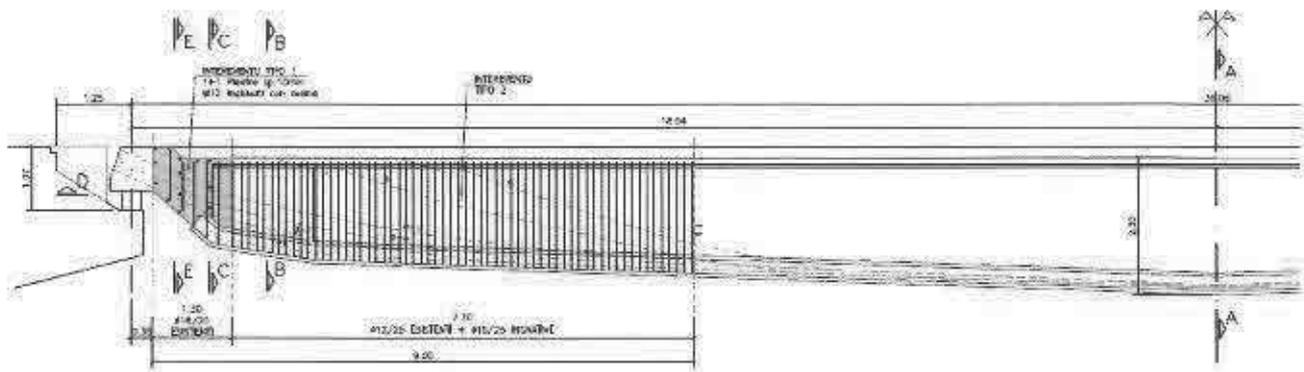
Il viadotto è composto da 12 campate di luce variabile, per uno sviluppo totale di circa 1100 ml, e ospita entrambe le vie di corsa dell'Autostrada A/10. Le campate presentano differenti schemi statici: travata semplicemente appoggiata e Gerber, travata continua e sistemi bilanciati con stralli in c.a.p., le cui antenne sono numerate storicamente 9, 10 e 11. Gli impalcati semplicemente appoggiati sono costituiti da 6 travi, mentre quelli solidali alle pile e quelli sostenuti dai sistemi bilanciati hanno sezione a cassone pluricellulare, in entrambi i casi le strutture sono in c.a.p. a cavi scorrevoli.

Le analisi oggetto della presente relazione fanno riferimento unicamente agli elementi strutturali degli impalcati a travi affiancate, non sono invece indagate le sezioni a cassone pluricellulare dei sistemi bilanciati.

Le travi indagate delle campate del Viadotto Polcevera hanno mediamente una luce pari a 36.0 m, l'impalcato è unico per entrambe le carreggiate e consta di 6 travi, armate ciascuna con 10 cavi (di cui 2 in soletta) da 18 o 21 fili, di diametro 7 mm. La numerazione delle travi è separata per le due carreggiate: lato Mare (Est) e lato Monte (Ovest). Le travi risultano armate ciascuna con 10 cavi (di cui 2 in soletta) da 18 o 21 fili, di diametro 7 mm. Nelle figure alle pagine seguenti sono rappresentate schematicamente le caratteristiche delle travi.

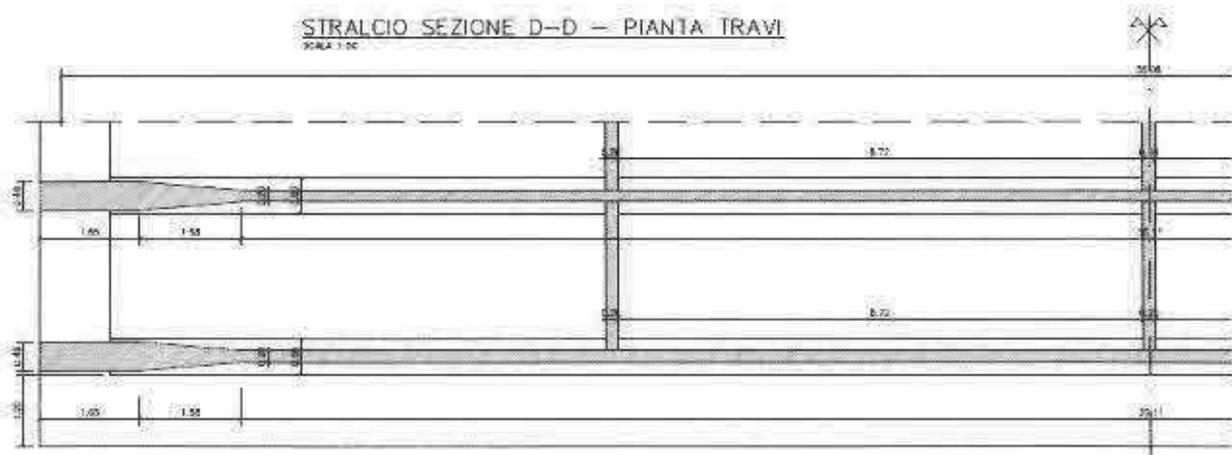
# IMPALCATO E5





**STRALCIO SEZIONE D-D - PIANTA TRAVI**

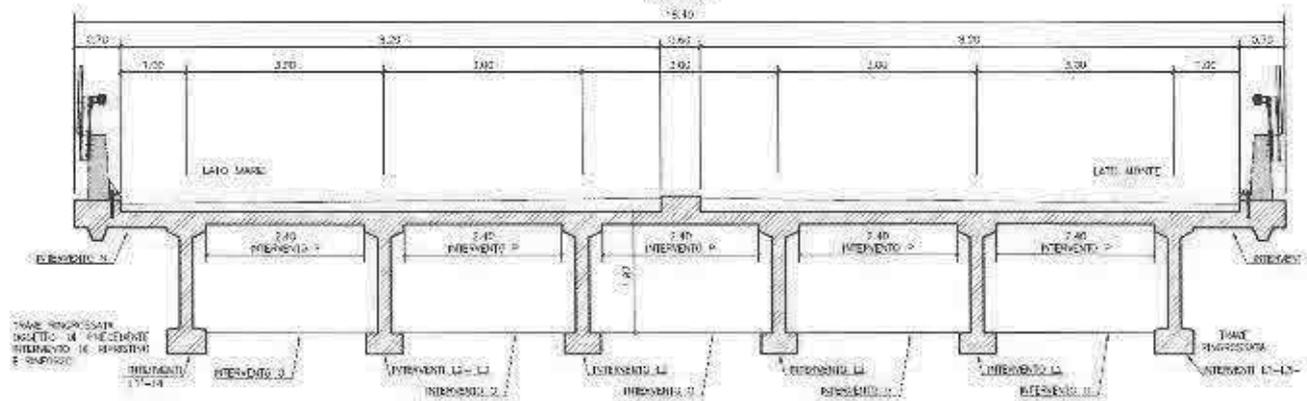
SCALA 1:50

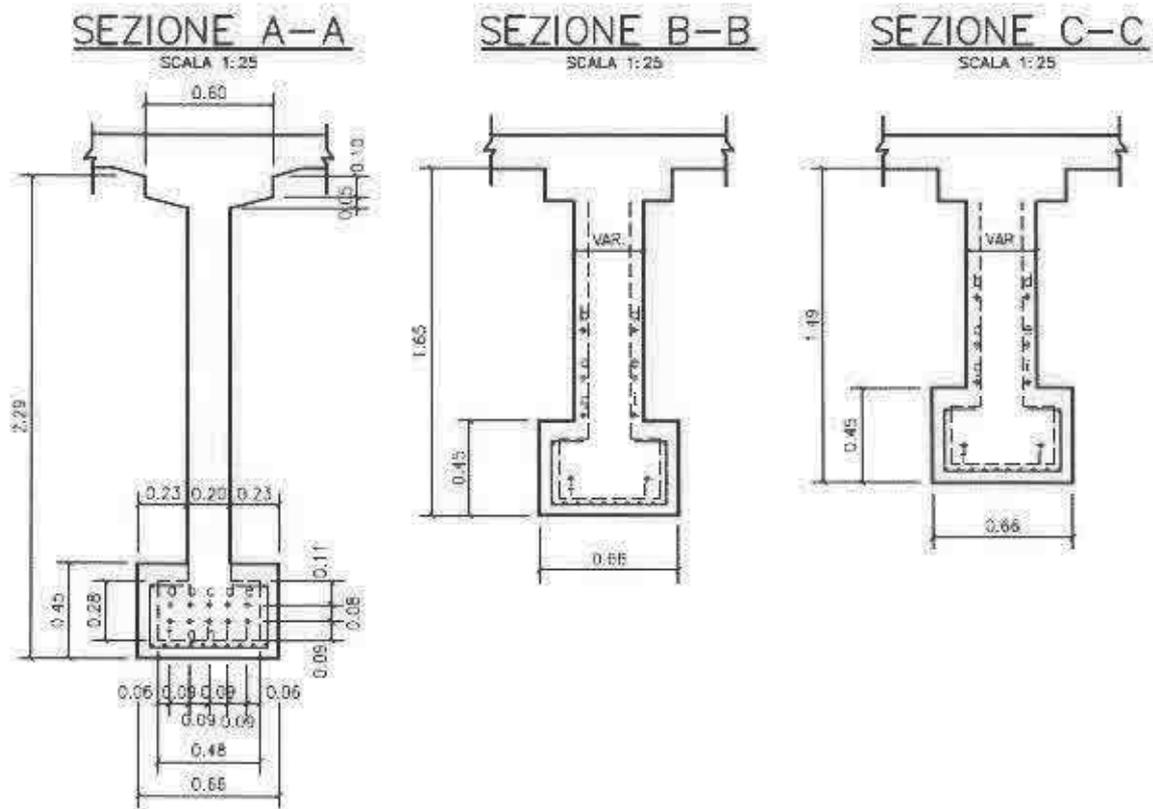


**SEZIONE A**

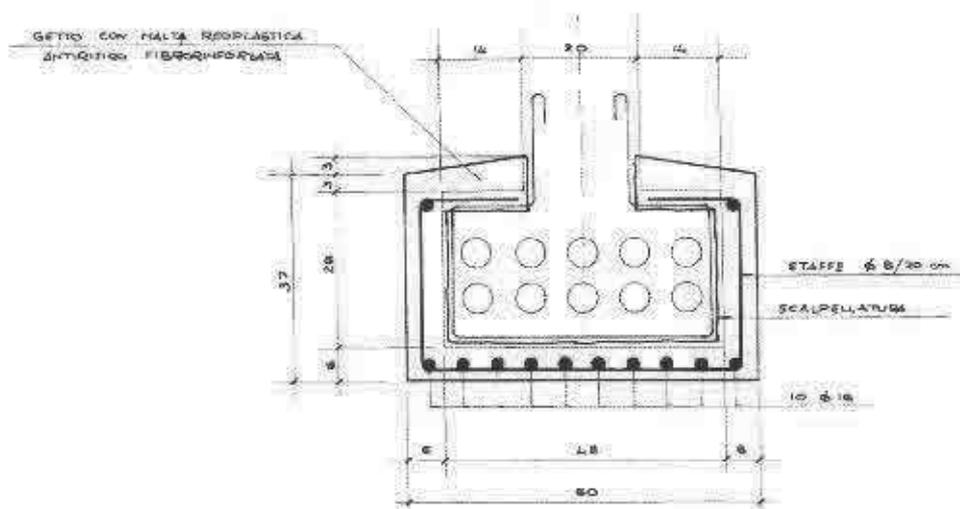
SCALA 1:50

18.40





Il viadotto è stato oggetto nel corso degli anni di diversi interventi di manutenzione straordinaria, che hanno interessato in vario modo le elevazioni, i sistemi bilanciati e le travi degli impalcati. Gli interventi di ripristino delle campate a travi in cap, eseguiti negli anni '90, sono principalmente consistiti nel ringrosso del bulbo inferiore di alcune travi, generalmente quelle di bordo. Dagli elaborati progettuali tale ringrosso, è costituito da un getto di malta fibrorinforzata di spessore pari a 6 cm armato longitudinalmente con barre  $\varnothing$  16 mm poste all'intradosso della trave e trasversalmente con staffe  $\varnothing$  8 mm / 20 cm.



## **QUADRO GENERALE DELLE INDAGINI DIAGNOSTICHE**

Sulle travi degli impalcati sono state eseguite nel tempo vari tipi di indagine:

- Anno 2011: indagine visiva di alcune travi, del degrado e dissesto dei conglomerati e delle armature lente e di precompressione, con eventuale parziale demolizione e scarificazione delle superfici; misure della velocità ultrasonica collegate a misure sclerometriche per valutare le caratteristiche dei conglomerati
- Anno 2012/2013: indagini riflettometriche sui cavi di precompressione di alcune travi, finalizzate a valutare lo stato di corrosione dei trefoli e delle condizioni di iniezione
- Anno 2013: nuova campagna di indagini visive, misure ultrasoniche e sclerometriche
- Anno 2015: nuova campagna di indagini riflettometriche

Tutte le indagini hanno messo in evidenza, nell'arco temporale di riferimento, una generale evoluzione peggiorativa dello stato di degrado e dissesto degli elementi strutturali.

In alcuni casi più significativi, l'evoluzione dei fenomeni ha dato luogo a significativi deterioramenti degli elementi, con rottura dei materiali, distacchi di precedenti interventi di rinforzo, corrosione delle armature, e con ragionevole parziale perdita di presollecitazione nelle travi in cemento armato precompresso.

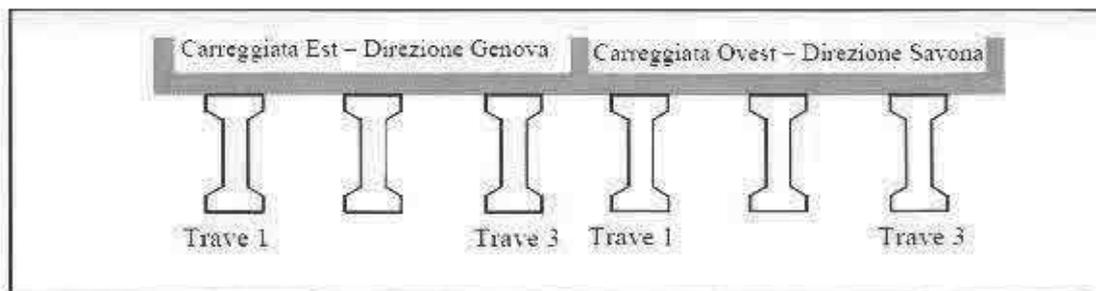
Gli elementi strutturali indagati dalle varie campagne di indagini sono riportati nella seguente tabella (*a meno di dati al momento non a disposizione dello scrivente*)

### **LEGENDA:**

**INDAGINE TIPO A:** indagine visiva con eventuale parziale demolizione e scarificazione

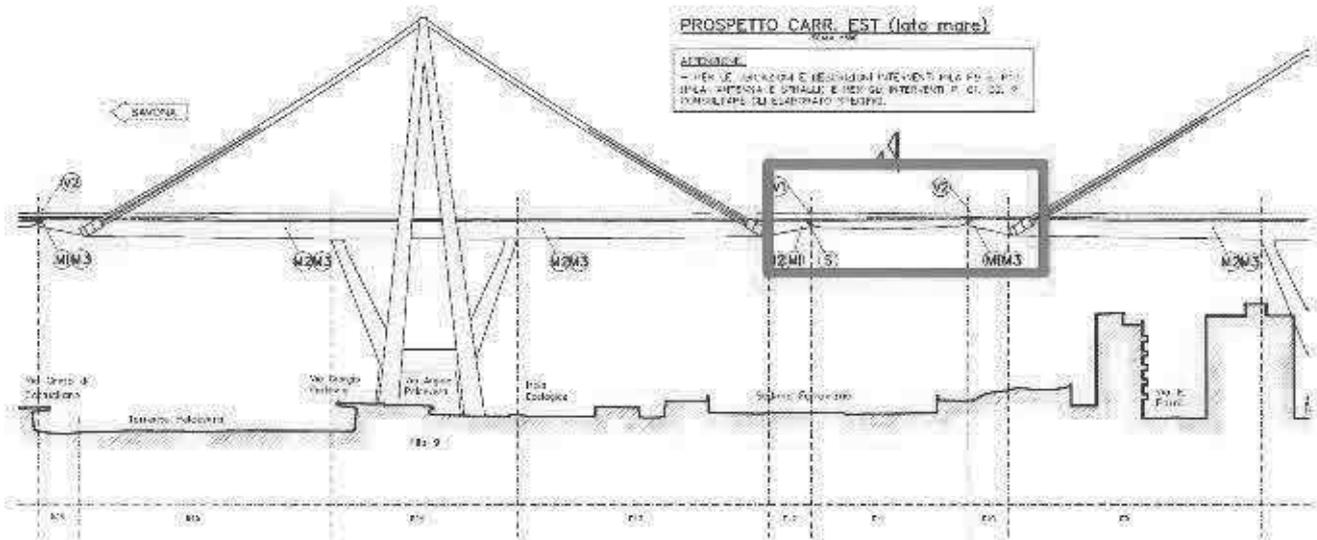
**INDAGINE TIPO B:** misura sclerometrica, misura velocità ultrasonica

**INDAGINE TIPO C:** misure riflettometriche



CAMPATA	CARREGGIATA	TRAVERE	INDAGINI			
			2011	2012/2013	2013	2015
E5 (tra pile 10 e 11)	OVEST (dir. Savona)	T3 (monte)		C		C
		T2 (centrale)				
		T1 (mare)				
	EST (dir. Genova)	T3 (monte)				
		T2 (centrale)				
		T1 (mare)	A+B	C	A+B	C
E11 (tra pile 9 e 10)	OVEST (dir. Savona)	T3 (monte)		C		C
		T2 (centrale)				
		T1 (mare)				
	EST (dir. Genova)	T3 (monte)				
		T2 (centrale)		C		C
		T1 (mare)	A+B+C	C	A+B	C
E17	OVEST (dir. Savona)	T3 (monte)		C		C
		T2 (centrale)				
		T1 (mare)				
	EST (dir. Genova)	T3 (monte)				
		T2 (centrale)				
		T1 (mare)		C	A+B	C
E21	OVEST (dir. Savona)	T3 (monte)	C	C		C
		T2 (centrale)				
		T1 (mare)				
	EST (dir. Genova)	T3 (monte)				
		T2 (centrale)				
		T1 (mare)	A+B+C	C	A+B	C
E25	OVEST (dir. Savona)	T3 (monte)	C	C		C
		T2 (centrale)				
		T1 (mare)				
	EST (dir. Genova)	T3 (monte)				
		T2 (centrale)				
		T1 (mare)	C	C	A+B	C
E29	OVEST (dir. Savona)	T3 (monte)	C	C		C
		T2 (centrale)				
		T1 (mare)				
	EST (dir. Genova)	T3 (monte)				
		T2 (centrale)		C		C
		T1 (mare)	A+B+C	C	A+B	C
E33	OVEST (dir. Savona)	T3 (monte)		C		C
		T2 (centrale)				
		T1 (mare)				
	EST (dir. Genova)	T3 (monte)				
		T2 (centrale)		C		C
		T1 (mare)	A+B+C	C	A+B	C
E37	OVEST (dir. Savona)	T3 (monte)				
		T2 (centrale)				
		T1 (mare)				C
	EST (dir. Genova)	T3 (monte)				
		T2 (centrale)				
		T1 (mare)	A+B	C	A+B	C
E41	OVEST (dir. Savona)	T3 (monte)	C	C		C
		T2 (centrale)				
		T1 (mare)		C		
	EST (dir. Genova)	T3 (monte)				
		T2 (centrale)				
		T1 (mare)	C	C	A	C
E45	OVEST (dir. Savona)	T3 (monte)		C		C
		T2 (centrale)				
		T1 (mare)				
	EST (dir. Genova)	T3 (monte)				
		T2 (centrale)				
		T1 (mare)		C	A	

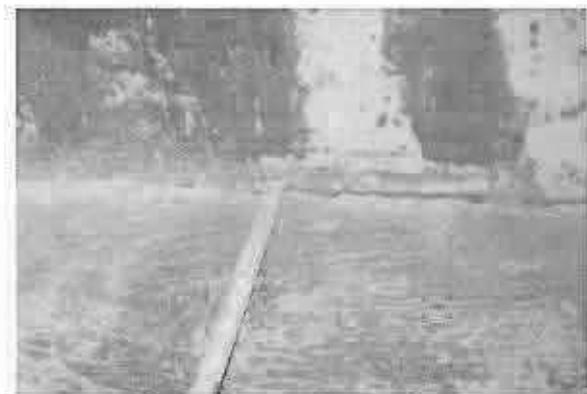
## CAMPATA E11 – CARREGGIATA EST (DIR. GENOVA) – TRAVE T1 (LATO MARE)



La porzione di impalcato si trova tra la pila 9 e la pila 10, e come già detto, è formato da 6 travi in c.a.p. affiancate, di lunghezza pari a circa 36 m.

### INDAGINI DIAGNOSTICHE DIRETTE

Nel 2011 la trave di bordo lato mare presentava un distacco tra l'anima ed il ripristino del bulbo inferiore con ampiezza massima di circa 5 mm che si estendeva per diversi metri con una profondità misurata di circa 10 cm sulla parete esterna.



Nel primo quarto della campata, sia sulla parete lato mare che su quella lato monte dell'anima della trave, il copriferro presentava in più punti forte risonanza e copriferro in distacco.

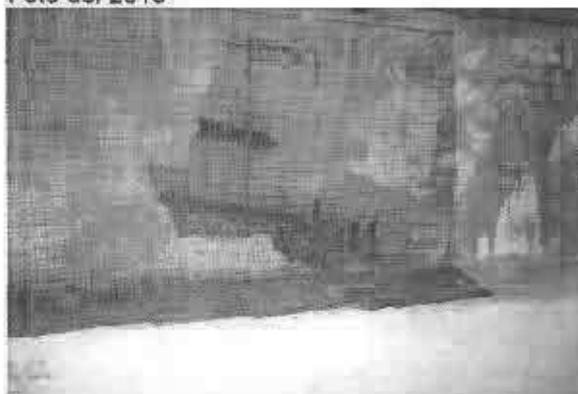
Sempre nel 2011, nella sezione a circa 2.80 ml dall'appoggio lato Savona, si sono potuti esaminare, a due diverse altezze, due cavi di precompressione. Il cavo più alto appariva senza iniezione. Erano visibili circa metà dei fili di ogni cavo, dove i fili sono apparsi fortemente corrosi e ridotti di sezione. In ogni cavo sono stati osservati almeno 4 fili rotti. Nella sezione a circa 6.00 ml dall'appoggio lato Savona è stato nuovamente intercettato il cavo più alto, che si trovava in analogo stato di conservazione. Tutti i fili esaminati risultarono "deformabili" anche solo facendo leva con uno scalpello, e si poté quindi ritenere che fossero "non efficaci".

La zona del dissesto è stata protetta con una rete, posta in opera al fine di evitare la caduta di materiale.

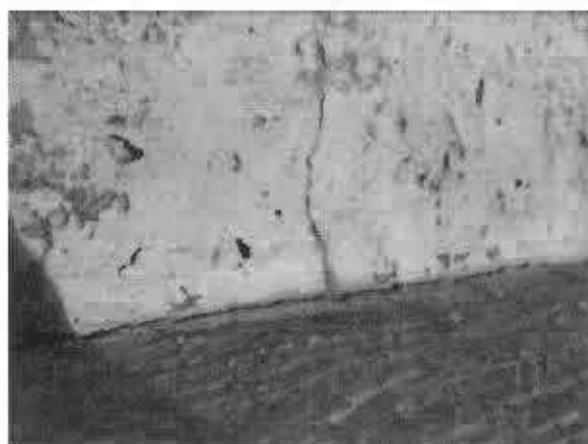
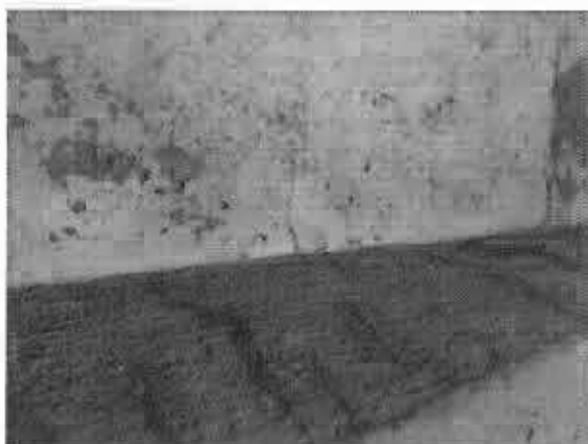
Foto del 2011



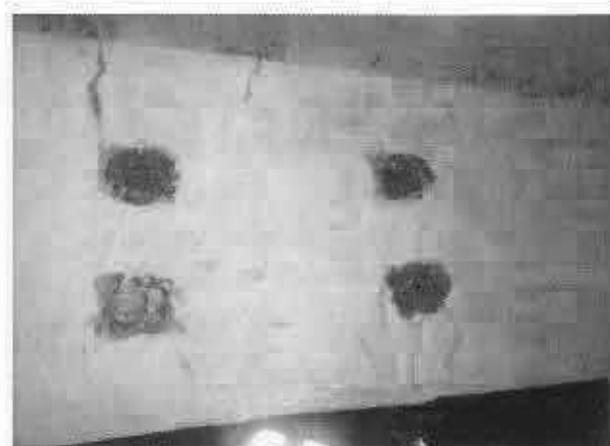
Foto del 2013



In prossimità della mezzeria della campata sono presenti alcune lesioni verticali nell'anima della trave che si sviluppano per un'altezza di circa 15 cm dal bulbo. Tali lesioni non risultano passanti, sono visibili soltanto nella parete lato esterno dell'anima della trave.



Sono inoltre presenti delle lesioni anche nella parete verticale ed in quella superiore del bulbo stesso. All'intradosso del bulbo è presente una lesione longitudinale che si sviluppa pressoché per tutta la lunghezza della trave.



Sul bulbo inferiore della trave sono state eseguite alcune indagini sclerometriche correlate a misure ultrasoniche, indagando complessivamente tre zone, una delle quali già esaminata nel 2011.

Gli unici valori di velocità ultrasonica apparente, rilevata per trasparenza, che è stato possibile misurare sia nel 2011 che nel 2013, sono generalmente compresi tra circa 1500 m/s a circa 200 m/s. In tutti gli altri punti non si è riusciti a misurare alcuna velocità perché il segnale non riusciva ad attraversare il materiale. Inoltre i valori misurati sono risultati molto bassi e indicano una discontinuità nel materiale attraversato che ne allunga tempo di attraversamento dell'onda.

In generale quindi le problematiche riscontrate più significative sono costituite dal distacco tra anima e bulbo inferiore, e la corrosione di cavi di precompressione con rottura di alcuni fili, a cui si aggiunge una lesione all'intradosso del bulbo e alcune lesioni verticali in prossimità della mezzeria nella parte inferiore dell'anima della trave e nel bulbo (lesioni visibili solo sul lato esterno della trave, ubicate non in corrispondenza di armatura).

### **INDAGINI RIFLETTOMETRICHE**

Alle indagini diagnostiche si affiancano quelle riflettometriche, eseguite in più campagne.

Nelle letture del 2012 venne riscontrata una estesa diffusione della corrosione nei trefoli indagati, con il raggiungimento, in alcune ridotte porzioni, del livello 3. Contemporaneamente si rilevarono anche anomalie nell'iniezione dei cavi di precompressione.

Nelle misure del 2015 vengono sostanzialmente confermati ed aggiornati i precedenti dati, mettendo in luce un peggioramento dello stato di salute dell'elemento strutturale.

Con riferimento ai risultati ottenuti, le estensioni cumulative percentuali rispetto alla lunghezza dei cavi delle anomalie di corrosione e di iniezione della trave in esame sono riportati di seguito. I valori sono da intendersi come frutto di un metodo qualitativo di indagine, e quindi utilizzabili solo per una considerazione generale (e non quantitativa) dello stato di degrado.

Corrosione livello 1: estensione 4,9 %

Corrosione livello 2: estensione 33,6 %

Corrosione livello 3: estensione 24,1 %

Iniezione livello 1: estensione 8,9%

Iniezione livello 2: estensione 30,2%

Iniezione livello 3: estensione 7,1 %

Figura 4a – Estensioni cumulative % delle anomalie di corrosione

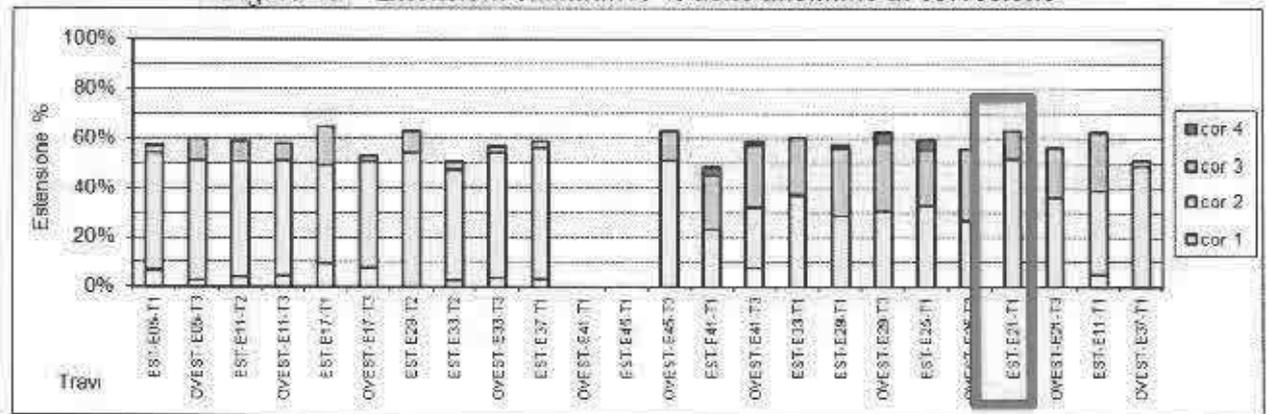
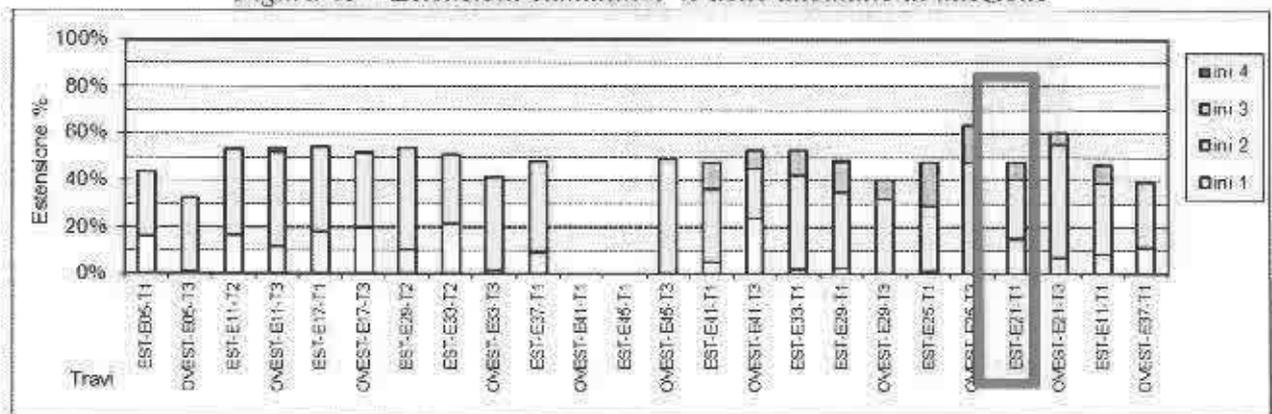


Figura 4b – Estensioni cumulative % delle anomalie di iniezione



L'evoluzione delle estensioni percentuali delle principali anomalie, considerando i dati del 2012/2013 e del 2015, vede un significativo aumento dei fenomeni:

Corrosione livello 2: +13,7 %

Corrosione livello 3: +8,3 %

Iniezione livello 1: +8,9%

Iniezione livello 2: +9%

### **COMPARAZIONE TRA STATO DI FATTO E INDAGINI RIFLETTOMETRICHE**

E' interessante mettere in relazione lo stato di degrado osservato dalle valutazioni visive dirette ed i risultati delle prove riflettometriche, per avere un riferimento tra lo stato reale della struttura indagata e le corrispondenti misure sperimentali.

Dalle immagini riportate, si vede che i cavi fortemente ammalorati riportati nelle foto (trave esterna lato mare, a circa 2,8 m dall'appoggio lato Savona) dovrebbero essere probabilmente i

trefoli "d" ed "c" (oppure "b" ed "a", nel caso di interpretazione speculare della figura della sezione).

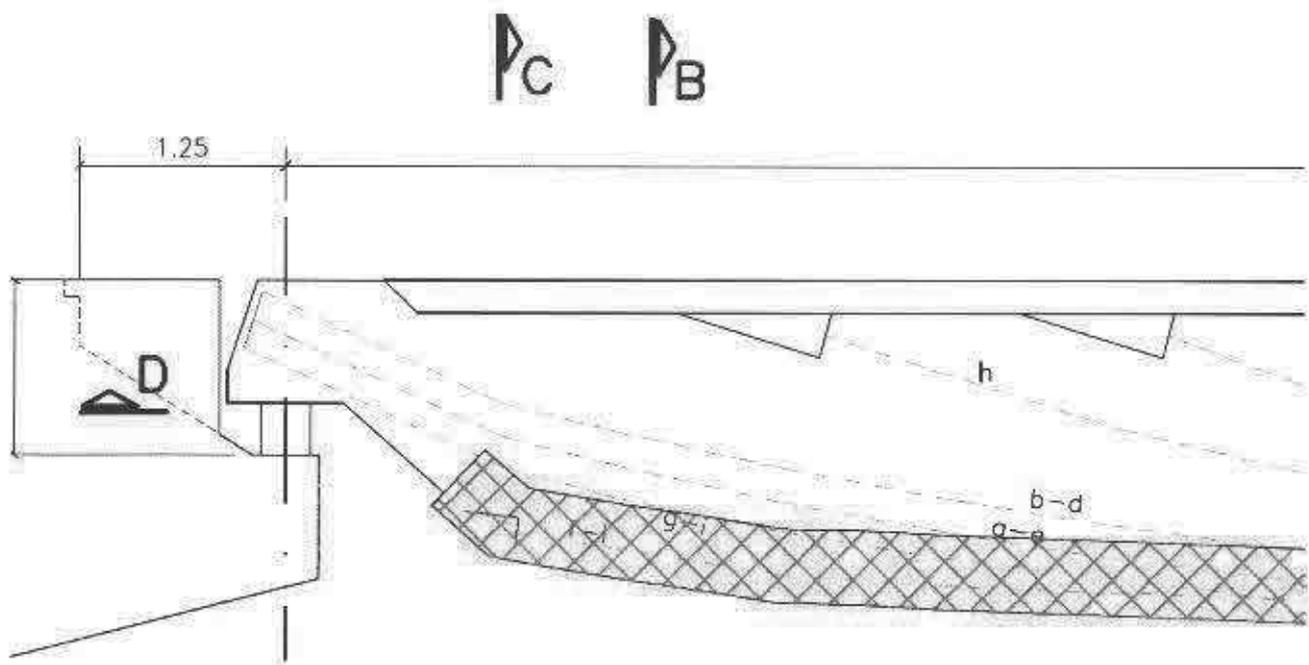
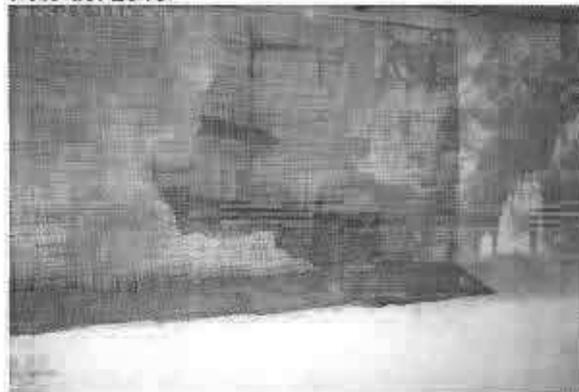


Foto del 2011

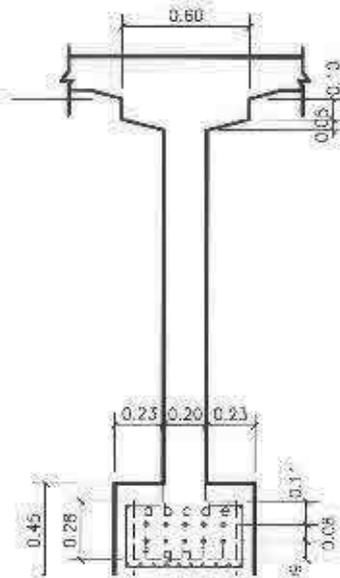


Foto del 2013



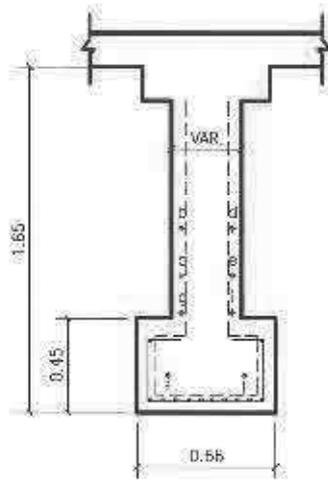
**SEZIONE A-A**

SCALA 1:25



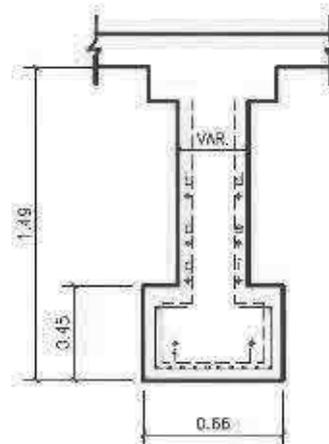
**SEZIONE B-B**

SCALA 1:25



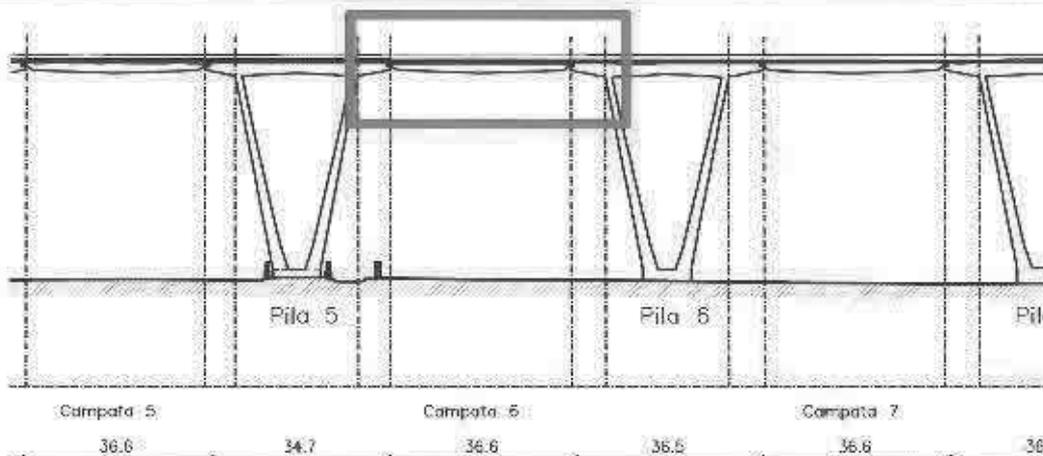
**SEZIONE C-C**

SCALA 1:25



Carr. Nr.	Camp. Nr.	Trave Nr.	Cavo Nr.	Testata	Lungh. Teor. m	Lungh. Mis. m	Corrosione			Iniezione		
							Da m	A m	Grado	Da m	A m	Grado
EST	E11	1	A	SV		35.9	0.0	8.9	3.2	0.0	4.3	2.2
							12.8	16.4	2.8	7.5	12.8	1.8
							19.2	21.3	1.8	19.0	22.0	1.8
							28.9	32.0	2.8	23.1	28.6	1.8
							33.4	35.9	2.0	31.0	33.6	1.0
EST	E11	1	B	SV		36.1	0.0	5.9	2.8	3.2	8.2	1.8
							8.4	14.4	2.0	16.0	20.7	1.0
							20.4	24.0	2.0	29.3	32.8	3.0
							25.6	29.4	2.8			
							31.0	34.8	2.0			
EST	E11	1	C	SV		24.6	0.0	4.8	1.8	0.0	2.1	2.0
							6.8	9.1	2.8	5.0	10.2	2.0
							13.5	17.9	1.8	16.8	18.6	2.0
							19.5	21.3	2.0	22.8	24.6	2.8
							23.0	24.6	2.8			
EST	E11	1	E	SV		36.0	0.0	7.2	1.0	4.0	7.2	1.0
							12.6	15.9	1.8	13.1	17.9	2.0
							18.4	24.0	2.0	20.6	24.0	1.2
							26.5	32.1	2.0	25.3	28.5	2.0
							34.2	36.0	2.2	32.2	36.0	1.0
EST	E11	1	G	SV		36.3	0.0	5.1	3.0	0.0	3.0	2.8
							11.0	17.1	2.0	13.0	17.0	2.2
							20.5	25.8	1.8	26.3	30.4	2.0
							29.5	36.0	2.8	33.5	36.3	1.8
EST	E11	1	H	SV		30.6	0.0	2.5	2.2	3.4	5.9	2.0
							4.0	6.5	1.0	7.6	10.7	2.0
							8.1	14.4	2.0	12.4	18.4	3.2
							16.8	21.5	2.8	20.9	24.5	2.0
							24.9	27.0	1.8			
28.7	30.6	1.8										

## CAMPATA E29 – CARREGGIATA EST (DIR. GENOVA) – TRAVE T1 (LATO MARE)

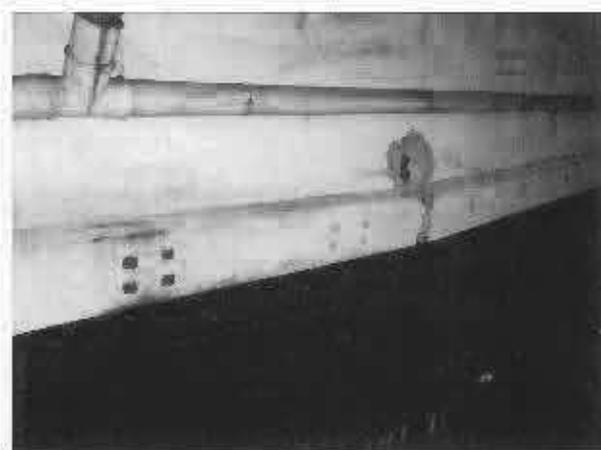


La porzione di impalcato si trova tra la pila 5 e la pila 6, alla fine della curva di immissione lato Savona, ed è formato da 6 travi in c.a.p. affiancate, di lunghezza pari a circa 36 m.

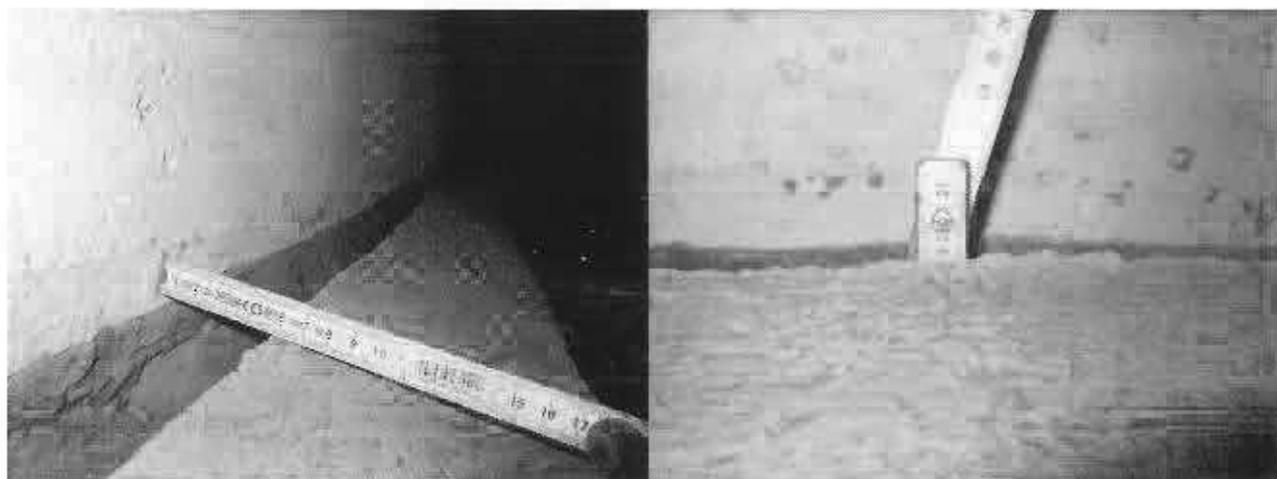
### INDAGINI DIAGNOSTICHE DIRETTE

Nel 2011 la trave di bordo lato mare presentava una profonda lesione per distacco in corrispondenza dello spigolo di unione tra il ringrosso del bulbo e l'anima della trave in c.a.p. sia nel lato esterno sia nel lato interno. Nel lato esterno la lesione si sviluppava dalla sezione di mezzeria fino a circa 5 ml dall'appoggio lato Genova, allargandosi progressivamente verso l'appoggio fino a 5 cm di larghezza per una profondità media di 10-15 cm. Nel 2013 è stata misurata una apertura della fessura di circa 6 cm ed una profondità di oltre 19 cm. La lesione quindi si presentava in evoluzione e si registrava un netto incremento delle dimensioni a distanza di due anni dalla prima misurazione. Nel corso delle indagini del 2011 è stato rilevato inoltre che la parete dell'anima a contatto con il ringrosso del bulbo non è stata preparata mediante scalpellatura, bensì è liscia, e l'armatura lenta integrativa all'interno del ringrosso della parete laterale lato mare è composta da 5 Ø20 mm ad aderenza migliorata.

A circa 3 ml dal traverso, a un quarto della luce lato Savona, nel campo verso Genova, la lesione presente esternamente tra anima e bulbo ripristinato della trave si allargava fino a circa 2 cm ed il cls di ripristino era apparentemente distaccato e risonante, mentre nella parte interna era apparentemente integro; la zona a circa 50 cm dal traverso di mezzeria verso Savona, già indagata nel 2011, era interessata da un distacco della trave che era stato rilevato anche lato monte per una estensione di alcuni metri.



A circa 1.50 ml dal traverso a un quarto della luce lato Genova, verso Savona, il bulbo è in distacco dall'anima e la frattura ha una apertura di circa 6 cm ed una profondità di oltre 19 cm. Tale ampiezza è maggiore di quella misurata durante i controlli del 2011.



Nella zona a circa 5 m dall'appoggio lato Genova, nel 2011 sono stati esaminati due cavi di precompressione, che risultavano in vista, per distacco del copri ferro: un cavo (costituito da 18 fili  $\varnothing$  7 mm) appartiene alla coppia di trefoli "b-d" e un cavo (costituito da 21 fili  $\varnothing$  7 mm) appartenente alla coppia di trefoli "a-c". In entrambi i cavi esaminati sono visibili 6+8 fili. In ciascuno dei cavi esaminati tutti i fili sono risultati fortemente ossidati, alcuni ridotti di sezione e, circa un paio per cavo, rotti. Tutti i fili in vista sono inoltre risultati "deformabili" facendo leva con un semplice scalpello, pertanto è probabile che tali cavi non presentino più la tensione prevista dalla precompressione iniziale e quindi siano da ritenere non efficaci.

A distanza di circa due anni il degrado ha avuto una evoluzione che ha portato ad una ulteriore ossidazione e corrosione dell'armatura di precompressione.

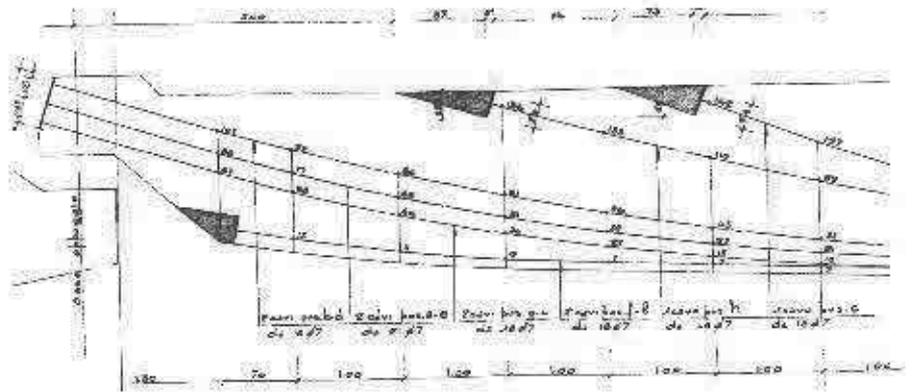
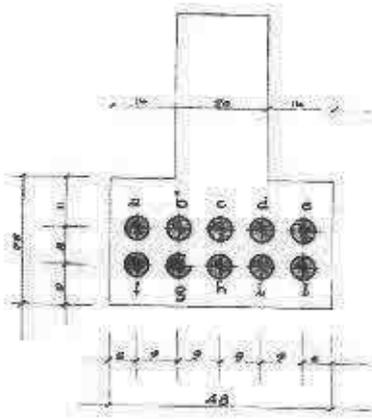


Foto del 2011

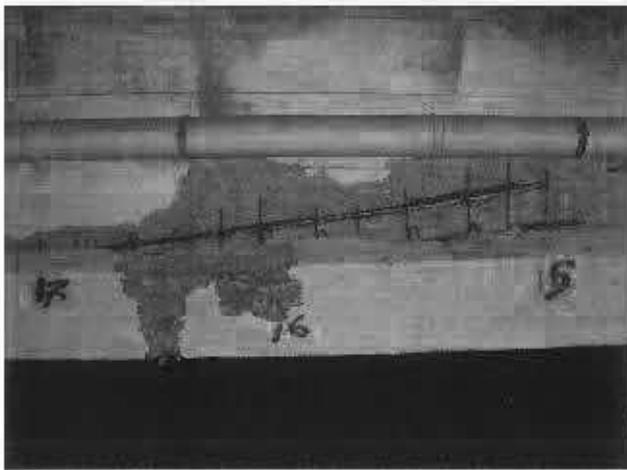


Foto del 2013





### INDAGINI RIFLETTOMETRICHE

Alle indagini diagnostiche si affiancano quelle riflettometriche, eseguite in più campagne.

Nelle letture del 2012 venne riscontrata una estesa diffusione della corrosione nei trefoli indagati, con il raggiungimento, in alcune ridotte porzioni, del livello 3. Contemporaneamente si rilevarono anche anomalie nell'iniezione dei cavi di precompressione.

Nelle misure del 2015 vengono sostanzialmente confermati ed aggiornati i precedenti dati, mettendo in luce un peggioramento dello stato di salute dell'elemento strutturale.

Con riferimento ai risultati ottenuti, le estensioni cumulative percentuali rispetto alla lunghezza dei cavi delle anomalie di corrosione e di iniezione della trave in esame sono riportati di seguito. I valori sono da intendersi come frutto di un metodo qualitativo di indagine, e quindi utilizzabili solo per una considerazione generale (e non quantitativa) dello stato di degrado.

Corrosione livello 1: estensione 0 %

Corrosione livello 2: estensione 28,7 %

Corrosione livello 3: estensione 27,6 %

Corrosione livello 4: estensione 1,1 %

Iniezione livello 1: estensione 2,9%

Iniezione livello 2: estensione 32,3%

Iniezione livello 3: estensione 12,4 %

Iniezione livello 4: estensione 1 %

Figura 4a – Estensioni cumulative % delle anomalie di corrosione

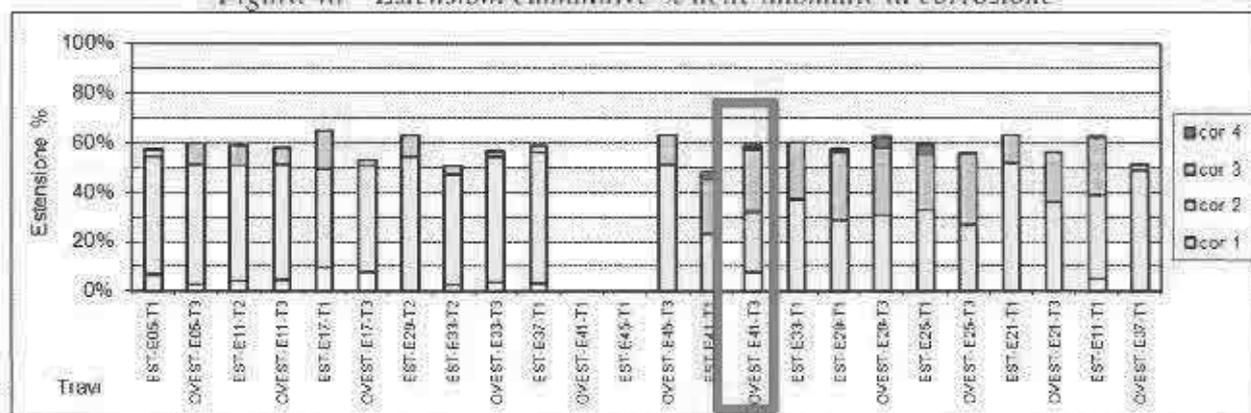
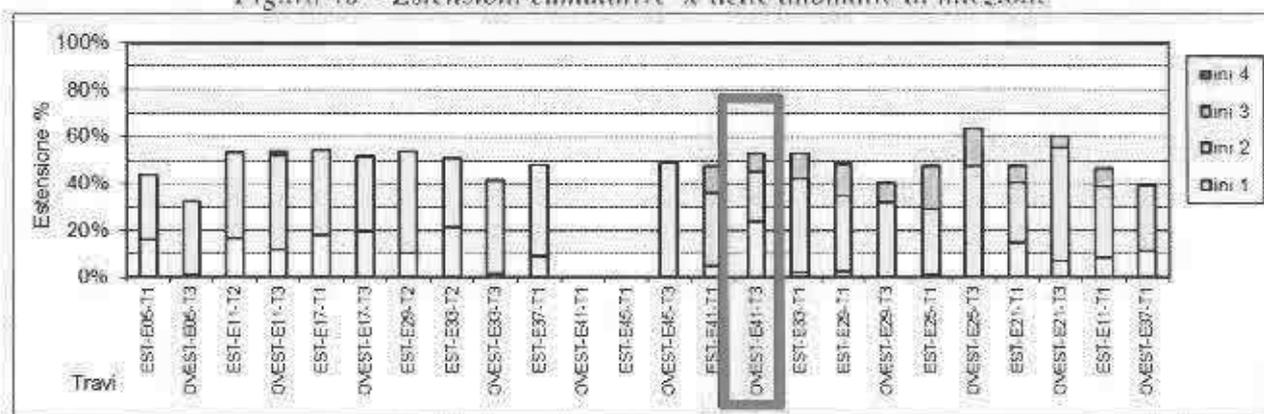


Figura 4b – Estensioni cumulative % delle anomalie di iniezione



**COMPARAZIONE TRA STATO DI FATTO E INDAGINI RIFLETTOMETRICHE**

E' interessante mettere in relazione lo stato di degrado osservato dalle valutazioni visive dirette ed i risultati delle prove riflettometriche, per avere un riferimento tra lo stato reale della struttura indagata e le corrispondenti misure sperimentali.

Dalle immagini riportate, si vede che i cavi fortemente ammalorati riportati nelle foto dovrebbero essere probabilmente i trefoli "d" ed "e" (oppure "b" ed "a", nel caso di interpretazione speculare della figure della sezioni)

	Carr. Nr.	Camp. Nr.	Trave Nr.	Cavo Nr.	Testata	Lungh. Teor. m	Lungh. Mis. m	Corrosione			Iniezione		
								Da m	A m	Grado	Da m	A m	Grado
EST	E29	1	A	SV		36.0	0.0	3.6	2.8	0.0	5.5	2.8	
							5.7	9.7	1.8	10.4	13.6	2.0	
							12.1	16.7	1.8	15.4	19.4	1.8	
							22.2	25.8	2.0	26.4	32.5	2.0	
							31.1	36.0	2.8				
EST	E29	1	B	SV		36.2	2.0	5.5	2.8	0.0	7.4	2.8	
							15.0	17.6	3.0	15.8	20.0	2.0	
							25.2	27.6	2.8	23.1	26.3	2.0	
							28.8	31.9	3.8	30.2	34.4	2.8	
							34.4	36.2	2.8				
EST	E29	1	D	SV		36.7	0.0	8.2	2.8	0.0	2.6	2.0	
							10.7	14.5	2.0	3.8	9.9	2.0	
							20.7	25.6	2.8	11.9	18.0	1.0	
							26.4	30.0	2.0	25.5	29.6	2.8	
							34.1	36.7	2.8	33.6	35.8	2.0	
EST	E29	1	E	SV		36.8	0.0	4.2	1.8	0.0	3.9	2.0	
							11.0	18.9	2.8	13.1	16.6	1.8	
							21.0	28.5	2.8	20.3	22.8	1.0	
							28.6	36.8	2.0	25.2	28.1	3.8	
										31.7	36.4	2.8	
EST	E29	1	F	SV		33.6	0.0	3.3	2.0	0.0	2.8	1.8	
							8.1	13.5	1.8	12.7	18.3	2.0	
							15.2	20.4	2.8	20.4	25.6	2.0	
							23.2	26.8	2.8	29.4	32.7	1.8	
							31.0	33.6	2.8				

### VERIFICHE DI SICUREZZA

Relativamente alle travi di impalcato in esame, nella redazione del progetto di consolidamento, il progettista ha eseguito una valutazione delle prestazioni e della sicurezza, mettendo in luce una possibile insufficienza degli elementi strutturali allo stato di fatto degradato.

Nella relazione infatti (elaborato STR002, pag. 21 e seguenti), nella valutazione dello stato di fatto (attualizzato), considera delle configurazioni di trave degradata, i cui risultati mettono in evidenza dei coefficienti di sicurezza inferiori all'unità.

### **VERIFICHE ALLO SLU PER FLESSIONE:**

- casi 1,2: stato attuale trave integra (perdita di precompressione pari allo 0%)
- casi 3,4: stato attuale trave degradata (perdita di precompressione pari al 25%)

CONDIZIONE	PERDITA DI PRECOMPRESSIONE	AZIONI
1	0%	PONTE CARICO (contributo armatura lenta)
2	0%	PONTE CARICO (senza contributo armatura lenta)
3	25%	PONTE CARICO (contributo armatura lenta)
4	25%	PONTE CARICO (senza contributo armatura lenta)

combinazione dei carichi e verifiche allo SLU

1,35 G <sub>1</sub> + 1,35 G <sub>2</sub> + 1,35 Q	
M <sub>sd</sub>	20339 kNm

combinazione fondamentale allo SLU

	M <sub>sd</sub> [kNm]	M <sub>td</sub> [kNm]	F <sub>s</sub>	decadimento F <sub>s</sub> [%]	degrado [%]	note
CASO 1-trave integra	20339	20553	1,01	-	0	con contributo armatura lenta
CASO 3-trave degradata	20339	16173	0,80	-21,31%	25	con contributo armatura lenta
CASO 2-trave integra	20339	18901	0,93	-	0	senza contributo armatura lenta
CASO 4-trave degradata	20339	14438	0,71	-23,61%	25	senza contributo armatura lenta

#### VERIFICHE ALLO SLU PER TAGLIO:

- caso 1 : stato attuale trave integra (perdita di precompressione pari allo 0%)
- caso 2 : stato attuale trave degradata (perdita di precompressione pari al 25%)

CONDIZIONE	POS. TRAVE	PERDITA DI PRECOMPRESSIONE	AZIONI
1	BORDO	0%	PONTE CARICO
2	BORDO	25%	PONTE CARICO

		SEZIONI DI VERIFICA	V <sub>sd</sub> [kNm]	V <sub>td</sub> [kNm]	F <sub>s</sub>
STATO ATTUALE (INTEGRA) COND. 1	0,35-1,30		1127	1062	0,94
	1,3		1127	1043	0,93
	3,5		1172	1121	0,96
	9,0		1015	1248	1,23
STATO ATTUALE (DANNO) COND. 2	0,35-1,30		1783	1062	0,60
	1,3		1783	1043	0,58
	3,5		1354	1121	0,83
	9,0		1031	1248	1,21

## ANNESSO 4 - Estratto dalla pubblicazione "PEDEFERRI: LA CORROSIONE NEL CALCESTRUZZO"

### CONSIDERAZIONI GENERALI

(Nota dello scrivente: Nel calcestruzzo giovane)

...in queste condizioni, che sono dette di passività, la velocità di corrosione è praticamente nulla. Anche le armature annegate nel calcestruzzo correttamente confezionato e messo in opera si ricoprono dello stesso film di ossido che le protegge perfettamente.

Purtroppo, nel tempo, il calcestruzzo perde le sue caratteristiche protettive. Questo si verifica essenzialmente per due motivi.

1. Partendo dagli strati più esterni e passando via via a quelli più interni, l'alcalinità del calcestruzzo viene neutralizzata dall'anidride carbonica presente nell'atmosfera, per cui la soluzione all'interno dei suoi pori passa da  $pH > 13$  a  $pH < 9$  (a questo processo si dà il nome di carbonatazione). A questi valori di pH il film di ossido viene distrutto e, quindi, anche le condizioni di passività.

2. Nel calcestruzzo a contatto con ambienti contenenti cloruri, questi ioni penetrano al suo interno fino a raggiungere le armature. Se alla superficie delle armature il loro tenore supera un valore critico (compreso tra 0,4-1 % in massa rispetto al contenuto di cemento), il film protettivo risulta localmente perforato.

La distruzione del film, e quindi delle condizioni di passività, è la preconditione per il prodursi della corrosione. Questa ha poi effettivamente luogo solo se alla superficie delle armature sono presenti acqua e ossigeno.

Di conseguenza, una volta che la carbonatazione o i cloruri hanno raggiunto le armature e le hanno depassivate, la corrosione si manifesta sulle parti delle strutture che vengono a contatto con l'acqua o sono bagnate dalla pioggia.

Al contrario nelle zone riparate dalla pioggia, e quindi in particolare all'interno degli edifici, la corrosione non si produce tranne che negli ambienti molto umidi o dove si verificano infiltrazioni d'acqua o risalite capillari oppure dove il calcestruzzo contiene sali igroscopici come i cloruri.

.....omissis

La situazione peggiore è quindi quella caratterizzata da cicli asciutto-bagnato che favoriscono, seppur in tempi diversi, l'ingresso sia dell'acqua che dell'ossigeno (oltre che degli agenti depassivanti: anidride carbonica e cloruri).

La carbonatazione distrugge completamente il film protettivo; i cloruri ne provocano,

invece, una "rottura" localizzata, ma se il loro tenore raggiunge valori molto elevati questa può interessare l'intera superficie.

Pertanto la corrosione da carbonatazione si presenta uniformemente distribuita sull'armatura.

La corrosione da cloruri risulta invece di tipo localizzato con attacchi penetranti circondati da zone non corrose finché la concentrazione di cloruri rimane relativamente modesta, ma può diventare generalizzata e uniforme quando il loro tenore raggiunge

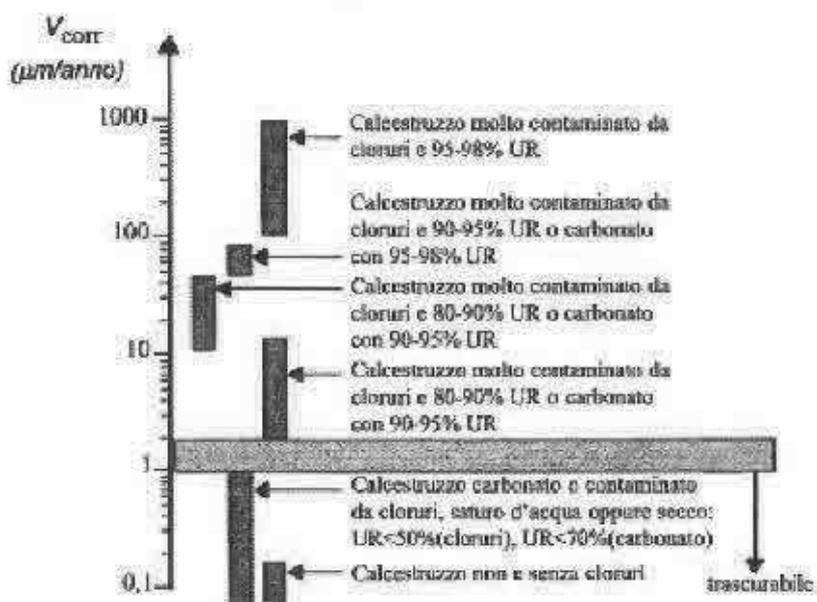
valori elevati. Il primo tipo di attacco si verifica spesso sulle solette dei ponti inquinati da cloruri, il secondo tipo soprattutto sulle strutture marine nella zona poco al di sopra del livello dell'acqua che è detta degli "zona degli spruzzi".

.....omissis

La corrosione sotto sforzo si può produrre su armature ad alta resistenza per strutture in calcestruzzo armato precompresso (ma non per le comuni armature per calcestruzzo armato). Infatti in condizioni ambientali, di potenziale, metallurgiche e meccaniche molto specifiche, è possibile che sulle armature ad alta resistenza si sviluppino cricche da infragilimento da idrogeno, in grado di portare a rottura 'fragile' il materiale.

### VELOCITÀ DI CORROSIONE

La velocità di corrosione viene misurata in genere in  $\mu\text{m}/\text{anno}$ . Finché questa si mantiene al di sotto di 1-2  $\mu\text{m}/\text{anno}$ , le conseguenze dell'attacco sulle armature sono trascurabili, almeno in relazione alla vita di servizio richiesta alle comuni opere in calcestruzzo armato.



Si noti come la velocità di penetrazione della corrosione da cloruri sia nettamente superiore a quella della corrosione da carbonatazione.

A volte la corrosione si manifesta soltanto su alcune parti delle strutture. In particolare è spesso critica la base dei pilastri dove risulta elevata l'umidità per presenza di risalite capillari o il tenore di cloruri a causa degli spruzzi delle automobili.

Anzitutto causa la riduzione della sezione resistente delle armature con conseguente diminuzione della loro capacità di sopportare i carichi statici o dinamici.

In secondo luogo può produrre attacchi localizzati. La presenza di questi attacchi, anche se di modesta profondità, può ridurre la duttilità del materiale e portare l'allungamento a rottura al di sotto del minimo accettabile.

Infine, in particolari condizioni e solo su acciai ad alta resistenza suscettibili di infragilimento da idrogeno, la corrosione può produrre idrogeno atomico alla superficie delle armature che può innescare fratture fragili.

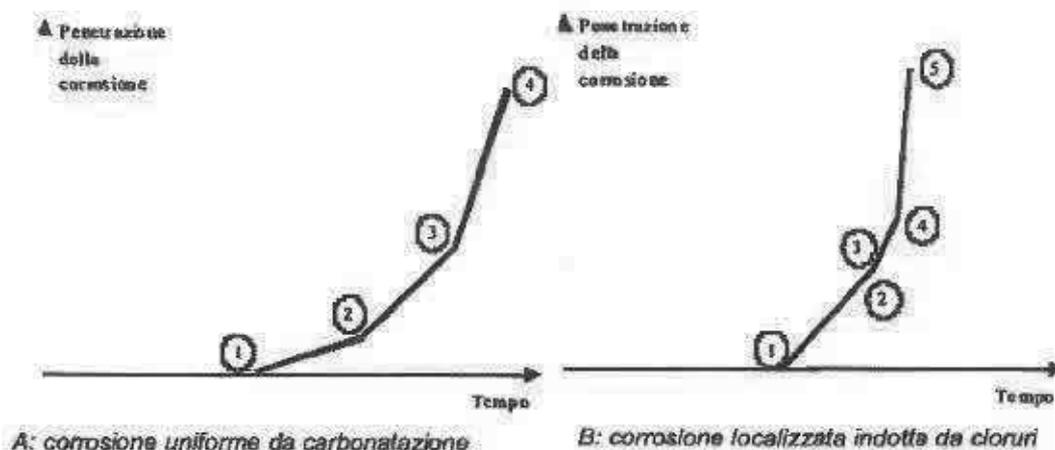
### **L'EVOLUZIONE DEL DEGRADO**

Dal punto di vista corrosionistico, nella vita delle strutture in calcestruzzo armato si possono individuare due periodi nettamente distinti come illustrato in Figura 1.3: un periodo di innesco della corrosione, in cui si producono i fenomeni che portano alla perdita delle condizioni di passività, cioè alla distruzione locale o generalizzata del film protettivo, e un periodo di propagazione più o meno veloce dell'attacco, a partire dal momento in cui il film protettivo viene distrutto fino al raggiungimento della propagazione massima accettabile. Questa distinzione è importante non solo perché i fenomeni corrosivi si manifestano solo nel secondo periodo, ma anche perché i fattori e le leggi evolutive che intervengono nei due periodi sono diverse. Ad esempio, la conducibilità del calcestruzzo e la presenza di ossigeno, poco importanti nel primo, lo sono nel secondo; l'opposto succede per lo spessore di copriferro e la qualità del calcestruzzo.

Il periodo di propagazione della corrosione da cloruri risulta ridotto rispetto a quello relativo alla corrosione da carbonatazione. Indicativamente mentre in quest'ultimo caso il periodo di innesco si può spesso ritenere pari a quello di propagazione, in presenza di cloruri non supera di solito il 0-20% della vita di servizio. Per questo motivo nel calcolo della vita di servizio di strutture a contatto con ambienti contenenti cloruri spesso lo si trascura.

La Figura 1.4-a schematizza l'evoluzione nel tempo del degrado di una struttura in calcestruzzo armato soggetta a corrosione uniforme come quella che si produce in calcestruzzo carbonatato. Il punto 1 segna l'insorgenza dell'attacco sulle armature, il punto 2 il raggiungimento di una condizione in cui inizia la fessurazione del calcestruzzo, il punto 3 quello in cui l'apertura

della fessura assume dimensioni tali per cui l'aderenza armature-calcestruzzo si annulla oppure si ha distacco del copriferro, infine il punto 4 indica il collasso della struttura.



È possibile valutare con discreta approssimazione il tempo di innesco del fenomeno corrosivo perché esistono modelli matematici che consentono di ricavare la penetrazione nel tempo della carbonatazione e dei cloruri.

L'approssimazione riguarda soprattutto le strutture che ancora devono essere costruite e deriva dalla difficoltà di definire i parametri da inserire nei modelli che dipendono dalle caratteristiche dell'ambiente e del calcestruzzo. Previsioni più precise si possono però fare per le strutture già esistenti.

Meno semplice è invece la valutazione della velocità di corrosione e la sua localizzazione nel caso di presenza di cloruri. Ancor meno è quella del tempo necessario per il raggiungimento delle condizioni di fessurazione o di espulsione del copriferro che sono funzione anche della resistenza a trazione del calcestruzzo, della posizione e della distanza tra le armature e dalle condizioni di confinamento.

Al procedere del degrado variano anche i costi di un eventuale restauro. Viene spesso ricordata la "regola del 5" o di De Sitter. E cioè: un euro speso per ottenere una struttura progettata e realizzata correttamente comporta benefici ottenibili spendendone 5 quando la costruzione è finita ma si trova ancora nel periodo di innesco della corrosione; 25 a partire dal momento in cui la sua propagazione è iniziata; e, infine, 125 quando oramai ha portato a fessurazioni nel copriferro.

### LA CORROSIONE DA CARBONATAZIONE

Quando l'anidride carbonica presente nell'atmosfera viene a contatto con il calcestruzzo tende a neutralizzare, a partire dagli strati più esterni, i suoi componenti alcalini.

.....omissis.....

La carbonatazione non provoca diminuzioni delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo.

.....omissis.....

La corrosione da carbonatazione interessa praticamente tutte le costruzioni in calcestruzzo armato dopo alcune decine d'anni di servizio o poco più.

.....omissis.....

## **AVANZAMENTO DELLA CARBONATAZIONE**

La reazione di carbonatazione inizia alla superficie esterna del calcestruzzo e poi interessa le regioni più interne. La sua penetrazione nel tempo segue una legge del tipo  $s = K \cdot t^{1/n}$  dove:  $s$  è lo spessore dello strato carbonatato,  $t$  il tempo e  $K$  il coefficiente di carbonatazione che può essere assunto come un indice della velocità di penetrazione della carbonatazione.

Nella maggioranza dei calcestruzzi l'esponente  $n$  vale circa 2 e quindi si ottiene un andamento della penetrazione della carbonatazione di tipo parabolico:  $s = K \cdot t^{0.5}$ . In calcestruzzi molto compatti  $n$  è maggiore di 2 per cui la diminuzione nel tempo della velocità di penetrazione è più marcata.

## **II PARAMETRO K**

Il parametro  $K$  che definisce la velocità di penetrazione della carbonatazione secondo l'equazione  $s = K \cdot t^{0.5}$ , dipende sia da fattori ambientali (umidità, temperatura, contenuto di anidride carbonica) sia da fattori legati al calcestruzzo stesso (quantità di cemento, tipo di cemento, porosità).

**Umidità.** La velocità di penetrazione della carbonatazione varia con l'umidità del calcestruzzo che è in equilibrio con l'umidità dell'atmosfera (a cui spesso si fa riferimento per definire le condizioni di umidità del calcestruzzo). Anzitutto il trasporto dell'anidride carbonica ha luogo facilmente attraverso i pori riempiti d'aria mentre avviene molto lentamente in quelli riempiti d'acqua (il rapporto tra le velocità di diffusione nelle due condizioni è di circa 100). Di conseguenza la velocità di diffusione dell'anidride carbonica diminuisce al crescere dell'umidità, fino praticamente ad annullarsi in calcestruzzo saturo. D'altra parte la reazione di carbonatazione vera e propria si produce soltanto in presenza d'acqua per cui, di fatto, per umidità relative dell'ambiente esterno inferiori al 50% non avviene con velocità apprezzabile. Per questi due opposti motivi, l'intervallo di umidità relativa più pericoloso per la carbonatazione è compreso tra 50 e 80%. Parametri importanti sono anche il tempo in cui la struttura resta bagnata, la frequenza e la durata dei cicli di bagnamento-asciugamento.

Si sottolinea l'importanza nelle situazioni concrete del microclima, cioè delle condizioni di umidità e temperatura che si creano nelle diverse parti della struttura per effetto anche della geometria della struttura stessa. Ad esempio nel caso di una parete esterna di un edificio in una zona riparata dalla pioggia la velocità di penetrazione è più elevata che nella zona non riparata (Fig. 2,1). Su una superficie orizzontale è inferiore rispetto ad una verticale. Analogamente, la velocità di penetrazione della carbonatazione all'esterno di un edificio in zona non schermata risulta inferiore che non all'interno.

Nelle superfici esposte a nord è inferiore che non in quelle esposte a sud.

I valori di K. Nel caso di strutture esistenti è possibile misurare nelle diverse parti dell'opera la penetrazione della carbonatazione e quindi, nota l'età della struttura, determinare sperimentalmente il coefficiente K. In questo modo si può prevedere con precisione l'andamento futuro della carbonatazione.

I valori di K misurati su strutture esposte all'atmosfera e protette dalla pioggia nelle condizioni di massima penetrazione variano indicativamente da 2 a 15 mm l'anno:  $2 < K < 5$  per calcestruzzi di elevata compattezza (cioè con basso a/c, ben costipati e maturati) e con elevato tasso di cemento;  $5 < K < 8$  per calcestruzzi di media compattezza;  $K > 8$  per calcestruzzi di bassa qualità.

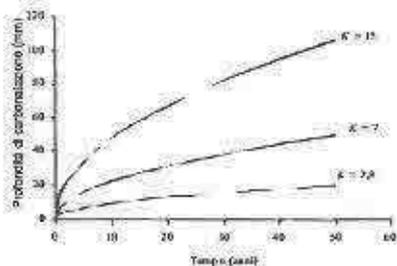


Figura 2.2 - Profondità di carbonatazione in funzione del tempo e di K valutata con la formula  $s = K t 0.5$ .

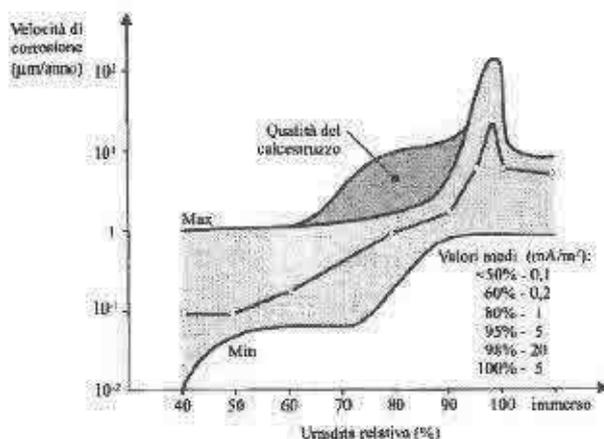


Figura 2.3 - Valori massimi, minimi e medi della velocità di corrosione in calcestruzzo carbonatato al variare dell'umidità ambientale (da Andrade).

In Figura 2.3 sono riportate le velocità di corrosione per carbonatazione in funzione dell'umidità relativa. Si può notare come in vicinanza delle condizioni di saturazione sia possibile raggiungere velocità di corrosione dell'ordine di 100  $\mu\text{m}/\text{anno}$ , mentre i valori più elevati riscontrabili nella maggioranza delle condizioni ambientali sono compresi tra 1 e 20  $\mu\text{m}/\text{anno}$ . I valori medi sono più bassi di quasi un ordine di grandezza. La velocità di corrosione si riduce a meno di 1  $\mu\text{m}/\text{anno}$  per umidità relative inferiori all'80%.

Pertanto la velocità di corrosione risulta elevata solo nelle zone bagnate o in condizioni di forte umidità o in presenza di bagnamenti o di condense alla superficie del calcestruzzo di durata e frequenza tali da far variare il tenore d'acqua a livello delle armature.

Risulta invece trascurabile nelle strutture non esposte all'esterno o comunque riparate dalla pioggia. Di conseguenza all'interno degli edifici il fatto che il calcestruzzo a livello delle armature sia carbonatato, non costituisce in genere un problema.

Ovviamente se ad esempio in seguito ad infiltrazioni d'acqua, a risalite capillari o a bagnamenti di qualsiasi genere, l'acqua dovesse penetrare nel calcestruzzo carbonatato, la velocità di corrosione non sarebbe certo più trascurabile.

Siccome nelle condizioni di umidità in cui la velocità di carbonatazione è massima la velocità di corrosione è modesta e viceversa, le situazioni peggiori sono quelle caratterizzate da alternanza di condizioni di bassa e di alta umidità, come succede nel caso del calcestruzzo esposto alla pioggia.

### **LA CORROSIONE DA CLORURI**

Quando il tenore dei cloruri sulle armature raggiunge un valore sufficientemente elevato. Questo tenore, detto tenore critico, dipende dal potenziale delle armature, che a sua volta è legato alla quantità di ossigeno che raggiunge la loro superficie.

Di conseguenza, l'attacco può aver luogo per un contenuto di cloruri relativamente modesto quando il calcestruzzo è esposto all'atmosfera, dove l'ossigeno può raggiungere facilmente le armature;

### **LA PENETRAZIONE DEI CLORURI**

Il tempo necessario perché alla superficie delle armature il tenore dei cloruri raggiunga il valore critico, detto tempo di innesco della corrosione, dipende dalla loro concentrazione sulla superficie esterna del calcestruzzo, dalle caratteristiche della matrice cementizia, dallo spessore di copriferro e dal loro tenore critico.

La penetrazione dei cloruri determina all'interno del calcestruzzo un profilo di concentrazione decrescente. Questa risulta elevata vicino alla superficie esterna per diminuire via via passando all'interno e per annullarsi, infine, a una certa distanza.

NOTA DELLO SCRIVENTE: una volta saltato il copriferro i cloruri e l'ossigeno sono a diretto contatto con le armature.

.....

Nelle strutture reali, il trasporto dei cloruri nel calcestruzzo si produce attraverso una combinazione di meccanismi. Ad esempio in un elemento strutturale soggetto a cicli di bagnamento e asciugamento, si produce assorbimento capillare della soluzione contenente cloruri nella fase di bagnamento, diffusione dei cloruri nel periodo di contatto con l'acqua e loro accumulo durante il successivo periodo di evaporazione dell'acqua.

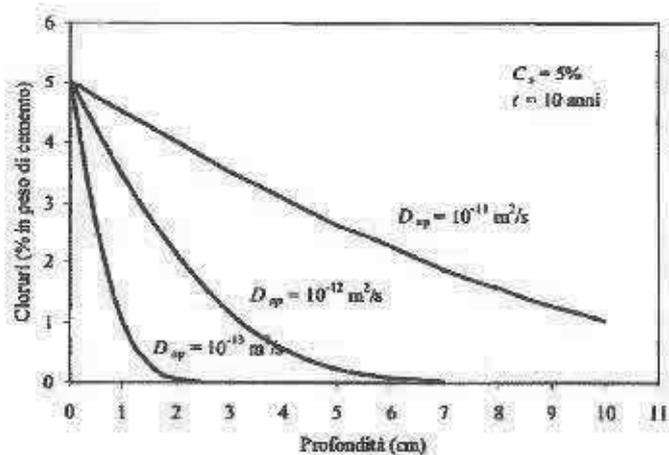
L'esposizione alla pioggia al contrario può allontanare i cloruri presenti nelle zone superficiali del calcestruzzo.

#### **DETERMINAZIONE DEI PROFILI DI CLORURI E LA VALUTAZIONE DEL TEMPO INNESCO**

L'esperienza relativa sia a strutture marine che a strutture esposte all'azione di sali antigelo mostra che, anche in presenza di meccanismi di penetrazione diversi dalla diffusione, si possono prevedere con buona approssimazione i profili di concentrazione dei cloruri nel tempo utilizzando l'equazione di Fick la cui soluzione è

$$C(x,t) = C_s \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_{ap}t}} \right) \right]$$

dove:  $C(x,t)$  è la concentrazione dei cloruri a una profondità  $x$  e al tempo  $t$ ,  $C_s$  la concentrazione di cloruri superficiale e  $D_{ap}$  il coefficiente di diffusione detto questa volta apparente (o effettivo).  $C_s$  e  $D_{ap}$  sono considerati costanti nel tempo e nello spazio.



Questa relazione (detta 'funzione degli errori: 'erf-function') viene utilizzata come uno strumento matematico per interpolare il profilo di cloruri e quindi determinare  $C_s$  e  $D_{ap}$  in una struttura già esistente di cui si conosce la concentrazione a diverse profondità.

La stessa relazione può essere utilizzata per prevedere il comportamento

a lungo termine di strutture esposte ad ambienti contenenti cloruri. Nell'ipotesi di conoscere o di poter stimare i valori della concentrazione di cloruri superficiale  $C_s$  e il coefficiente di diffusione  $D_{ap}$  la relazione soprascritta rende possibile prevedere l'evoluzione dei profili di cloruri all'interno del calcestruzzo (Fig. 3.1) e quindi, fissato il tenore critico di cloruri  $CCr$  prevedere il tempo necessario perché in un certo punto questo sia raggiunto (Fig. 3.2), cioè il tempo di innesco della corrosione.

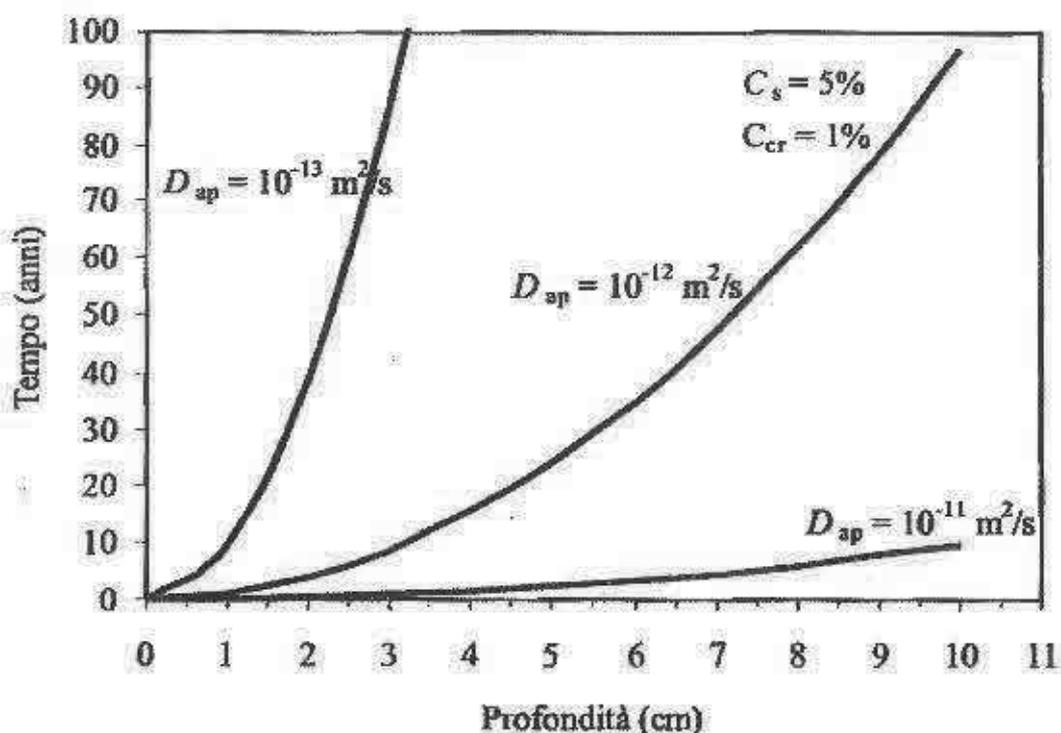


Figura 3.2 - Tempo di innesco alle diverse profondità nel calcestruzzo per diversi valori del coefficiente di diffusione nell'ipotesi di contenuto critico di cloruri pari dell'1 % e di concentrazione superficiale del 5%.

In effetti la conoscenza a priori dei valori  $C_s$  e  $D_{ap}$  e la loro costanza nel tempo e nello spazio non è scontata e  $C_{Cr}$  come si è visto, può variare in un ampio intervallo.

La concentrazione di cloruri superficiale  $C_s$  dipende dalla composizione del calcestruzzo, dalla posizione della struttura, dalla giacitura e l'orientazione della sua superficie, dal microambiente in cui opera, dalla concentrazione dei cloruri nell'ambiente e in generale dalle condizioni di esposizione riguardo soprattutto alla direzione, velocità e intensità del vento e della pioggia. Nelle strutture marine i valori più alti si trovano nella zona degli spruzzi dove l'evaporazione dell'acqua può portare ad un aumento della concentrazione dei cloruri fino anche al 4-5% rispetto al peso di cemento.

Il coefficiente di diffusione apparente  $D_{ap}$  dipende dalla struttura dei pori del calcestruzzo e quindi da tutti i fattori che la determinano come il rapporto  $a/c$ , la compattazione, la maturazione e la presenza di fessure. Anche il tipo di cemento impiegato ha un effetto notevole. Passando, a parità di aie, da calcestruzzi ottenuti con cemento Portland ad altri prodotti con cementi di miscela con aggiunte via via crescenti di pozzolana o di scoria granulata di altoforno,  $D_{ap}$  viene ridotto anche di un ordine di grandezza e, per di più, diminuisce negli anni.

## **VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE**

Nel caso di strutture esposte all'atmosfera, una volta che l'attacco localizzato si è innescato, la velocità di corrosione può passare da qualche decina di  $\mu\text{m}/\text{anno}$  a un  $1\text{ mm}/\text{anno}$ , al crescere del tenore di umidità dal 70 al 95% e del tenore di cloruri dall'1 al 3% (in peso rispetto al cemento). La velocità di corrosione cresce passando da climi temperati a climi tropicali. In pratica, quindi, in strutture contaminate da cloruri l'attacco corrosivo, una volta innescato, può portare in tempi brevi a riduzioni inaccettabili della sezione delle armature.

Il limite inferiore dell'umidità relativa in corrispondenza al quale la velocità di corrosione diviene trascurabile dipende dalle caratteristiche del calcestruzzo, dal contenuto di cloruri alla superficie del calcestruzzo e dal tipo di sale da cui provengono. In ogni caso questo limite risulta molto più basso di quello che rende trascurabili gli effetti di corrosione prodotti dalla carbonatazione. In presenza di alti tenori di cloruri, soprattutto di quelli più igroscopici come i cloruri di calcio o di magnesio, la velocità media di penetrazione dell'attacco può non risultare trascurabile anche per umidità relative esterne pari al 50%.

## **OPERE PIÙ A RISCHIO**

Le costruzioni in calcestruzzo armato più a rischio di corrosione da cloruri sono le strutture marine e i ponti autostradali sui quali si utilizzano sali antigelo.

.....

Ponti autostradali. I ponti autostradali su cui si spargono sali antigelo sono particolarmente soggetti a corrosione. Le solette, i pulvini, le colonne sono a rischio soprattutto laddove la presenza di giunti non sigillati, la mancanza o il non corretto posizionamento o funzionamento degli scarichi producono ristagni d'acqua ricca di cloruri. Nelle zone più critiche sono stati misurati tenori di cloruri e velocità di corrosione confrontabili con quelli della zona degli spruzzi nelle strutture marine.