



ITALIAN AICAP CTE CONCRETE CONFERENCE

ICC 2022 • Napoli
October 12-15 Ottobre

IL CALCESTRUZZO NELLA TRANSIZIONE ECOLOGICA CONCRETE IN THE ECOLOGICAL TRANSITION

ATTI

con il patrocinio di
under the patronage of

con il supporto organizzativo di
with the organizing support of



MEDIA PARTNER



www.italian-concrete-conference.com

Experimental durability tests on vibrofinished elements in situ subject to severe environmental conditions

Verifiche sperimentali in esercizio della durabilità di elementi vibrofiniti in c.a.p soggetti a condizioni ambientali severe

VD.Venturi¹, C Beltrami², P Darò³, L Roberti⁴, B Della Bella⁵

¹*Istituto di Ricerca e Sperimentazione Sidercem srl, Misterbianco (CT), Italia*

²*Lombardi Ingegneria srl, Milano, Italia*

³*Sacertis Ingegneria srl, Torino, Italia*

⁴*Gruppo Centro Nord SpA, Belfiore (VR), Italia*

⁵*Gruppo Centro Nord SpA, Belfiore (VR), Italia*

ABSTRACT: Jumbo hollowcore slabs have been prefabricated for over 35 years by Centro Nord Group with shear reinforcement in the ribs for artificial and railway tunnels, subject to severe environmental conditions with possible carbonation, cracking or degradation of concrete cover. In the paper, a deep experimental investigation is presented on structures for over 25 years in aggressive environments: underground floor in a marine environment (Genoa), and underground railway station deck (Turin), with wide spread percolation due to deteriorated waterproofing. The elaboration of the experimental results relating to carbonation depth and to measurements of corrosion potential and speed made it possible to evaluate the level of degradation and therefore the residual life of the prefabricated decks. The paper also analyzes possible monitoring methods that could be envisaged in infrastructural works for this type of prefabricated structures to be activated before service life / Le grandi lastre alveolari in c.a.p sono prodotte da oltre 35 anni dal Gruppo Centro Nord con armatura a taglio nelle nervature destinate anche per coperture di gallerie artificiali stradali e ferroviarie, in condizioni ambientali severe, tali da generare possibile carbonatazione, fessurazione e/o degrado del copriferro. Nella memoria viene presentata una approfondita indagine sperimentale su strutture in esercizio da oltre 25 anni in ambiente aggressivo, rispettivamente: un solaio interrato di garage in ambiente marino (Genova); un impalcato di stazione ferroviaria interrata (Torino), interessato da fenomeni diffusi di percolamento per impermeabilizzazione difettosa. L'elaborazione dei risultati sperimentali relativi alla determinazione della profondità di carbonatazione, alle misure del potenziale e della velocità di corrosione hanno consentito di quantificare il livello di degrado e di stimare la vita residua degli impalcati prefabbricati. Nella memoria vengono anche analizzate alcune ipotesi di monitoraggio che potrebbero essere previste nel progetto, da attivare preliminarmente all'esercizio delle infrastrutture.

KEYWORDS: durability; artificial tunnel; jumbo hollowcore; monitoring /durabilità; gallerie artificiali; grandi alveolari; monitoraggio

1 INTRODUZIONE

1.1 *Innovazione tecnologica e produttiva del GCN*

Il Gruppo Centro Nord fin dalla metà degli anni 60 tra le prime aziende ha promosso e sviluppato l'impiego dei solai alveolari in Italia, investendo in ricerca e tecnologie che hanno permesso di passare dalla produzione di elementi di 8 cm di spessore (1966) ai 100 cm di spessore ideati e realizzati sul finire dell'anno 2004. Il sempre più largo impiego di solai alveolari in costruzioni industriali e commerciali, e la domanda di maggiori luci e sovraccarichi hanno reso interessanti e richiesti tali spessori.

La maggiore altezza e gli elevati carichi anche dinamici connessi al loro utilizzo hanno reso necessario l'inserimento di armature taglio-resistenti nelle nervature verticali e di reti metalliche nella soletta d'intradosso. Le armature metalliche sono state adeguate nel corso degli anni agli affinamenti tecnologici delle vibro finitrici e dei progetti esecutivi.



Figure 1. Vibratory finishing machine for the production of FORAP slabs/Macchina vibrofinitrice per la produzione delle lastre FORAP.

L'innovazione tecnologica nella produzione di lastre alveolari è stata sviluppata in Italia, unica al mondo, mediante una sinergia tra NORDIMPIANTI, produttore di macchine vibrofinitrici e impianti con le due unità produttive del GRUPPO CENTRO NORD, con sede a Verona e a Novara ed il know-how esportato anche all'estero (Spagna, Portogallo e Malta).

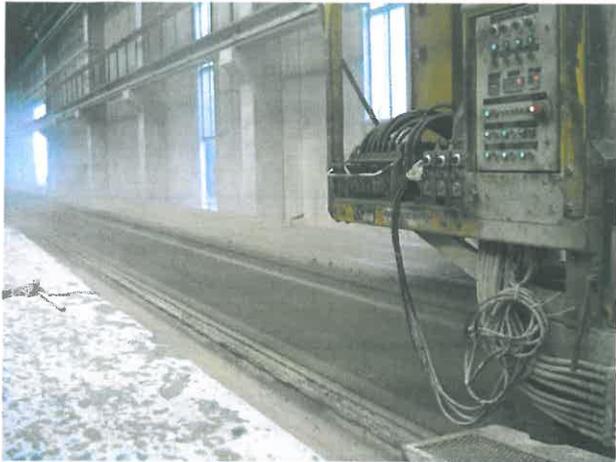


Figure 2. Production of large hollow core floors/Produzione di grandi solai alveolari

1.2 Caratteristiche delle sezioni e armature

Una delle innovazioni più importanti in questi elementi precompressi è la possibilità di incorporare armature continue e/o locali taglio resistenti nelle nervature verticali, che hanno uno spessore standard di 60÷80 mm, ma che può essere incrementata fino a 160/180 mm per particolari esigenze progettuali in caso di incendio (Gallerie artificiali RFI per Alta Velocità).

L'armatura principale è costituita da trefoli pretesi con un'area totale fino a 3000 mm² posizionati fino a 5 livelli diversi, tre nella soletta inferiore e due nella parte più alta della sezione.

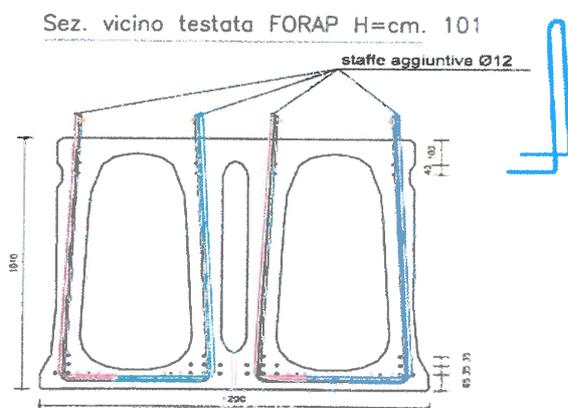


Figure 3. Slab section FORAP 100 for RFI/Sezione lastra FORAP100 per RFI

Le travi scatolari FORAP permettono la predisposizione di una maggiore armatura di precompres-

sione senza che questa generi problemi di "spalling" data l'armatura taglio-resistente (normalmente costituita da una rete elettrosaldata) che assorbe le tensioni di trazione proprie dello sviluppo della precompressione.

E' possibile inoltre l'applicazione di tali elementi con collegamento diretto con travi in opera anche in spessore di solaio, senza necessità di dente d'appoggio, o l'impiego per sovraccarichi tipici degli impalcati stradali, data l'armatura a taglio sempre presente nelle nervature verticali.

Tale armatura può essere integrata agli appoggi con staffe aggiuntive per coprire i maggiori valori di taglio di progetto in presenza di momenti di incastro in tali sezioni

Inoltre può essere prevista fuoriuscente all'estradosso per collegarsi con l'armatura della soletta collaborante



Figure 4. Slab FORAP 80 for Artificial Tunnel RFI/Lastra FORAP 80 per Gallerie Artificiali RFI

1.3 Esempi applicativi e di indagine

Il continuo sviluppo e le nuove applicazioni di questi grandi elementi precompressi prodotti in continuo, hanno determinato la necessità di approfondire il comportamento di tali elementi con nuove e più mirate ricerche teoriche e sperimentali.

Dopo oltre 26 anni di applicazioni in ambienti anche aggressivi, l'attività sperimentale, di cui più avanti viene data una sintesi, ha interessato le strutture del parcheggio pubblico "Calata Salumi" in Genova e la copertura della stazione GTT di Torino Caselle e si è proposta di stimare il livello di degrado delle strutture in c.a.p. ed il livello di corrosione dell'armatura pretesa degli impalcati.

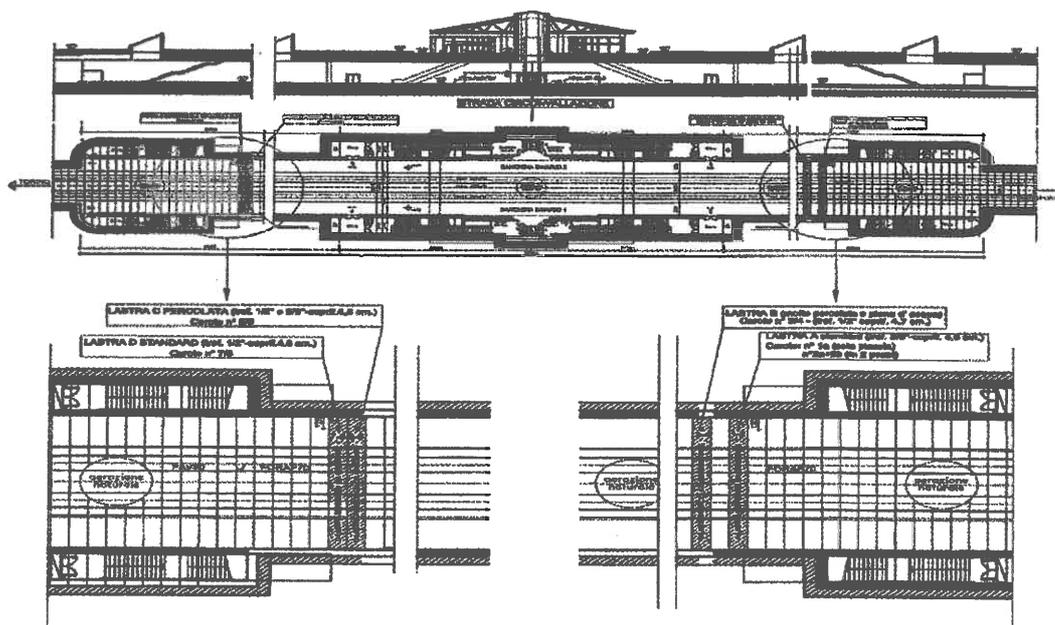


Figure 5. Location of the investigations "Coverage of the Turin Caselle GTT Station/Ubicazione delle indagini "Copertura della Stazione GTT di Torino Caselle."

L'indagine ha preso spunto dalla necessità di quantificare la durabilità delle lastre in c.a.p. preteso del tipo RAP e FORAP prodotte dal Gruppo Centro Nord dopo un numero significativo di anni di esercizio in condizioni severe rispettivamente:

- 26 anni per l'autorimessa di "Calata Salumi" al Porto Antico di Genova, ubicata in ambiente marino e quindi in classe di esposizione XC ed XS
- 22 anni per la Stazione GTT di Torino Caselle con evidenti problemi di percolazione di acque meteoriche e quindi in una condizione di criticità nei confronti della carbonatazione (classe di esposizione XC).

Le attività sperimentali sono consistite nella determinazione della profondità di carbonatazione, nella misura del potenziale e della velocità di corrosione dei trefoli, pretesi, delle lastre in c.a.p.

2 INDAGINE E RISULTATI SPERIMENTALI

2.1 Generalità

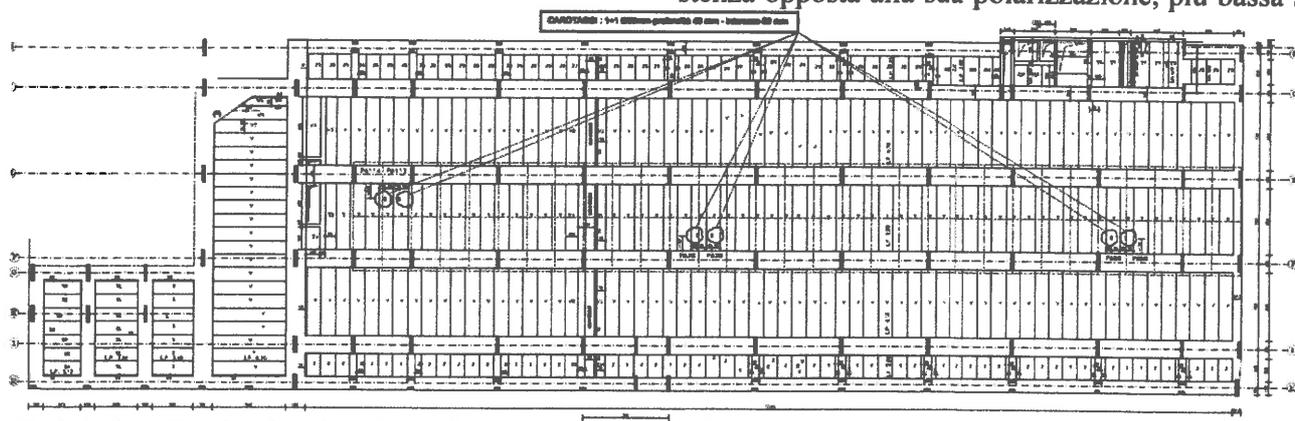


Figure 6 – Location of the investigations "Covering the Calata Salumi garage – Genova/Ubicazione delle indagini "Copertura garage di Calata Salumi – Genova."

Per ciascun sito è stata prevista una prima fase di campagna con prove e prelievi in situ seguita da una successiva fase di prove di laboratorio. Nella prima parte il rilievo visivo delle condizioni del manufatto, compreso lo stato del trefolo, in prossimità del prelievo, ha anticipato l'esecuzione delle prove.

È stato misurato lo spessore del copriferro ed è stata eseguita la misura del potenziale e della velocità di corrosione in corrispondenza di 6 lastre tipo RAP per il sito di Genova e di 4 lastre tipo FORAP per il sito di Torino.

In laboratorio sono stati determinati, a tre profondità, il valore del grado pH e la percentuale di cloruri presenti nel calcestruzzo prelevato dal sito di Genova ed il solo valore del grado pH del calcestruzzo delle carote prelevate dal sito di Torino Caselle.

Le Figg. 5 e 6 riportano l'ubicazione, in pianta, dei prelievi eseguiti, in corrispondenza dei quali sono state successivamente eseguite le misure del potenziale e della velocità di corrosione.

La misura della resistenza opposta dall'armatura alla sua polarizzazione che, ovviamente, risulta influenzata dalle condizioni esterne ambientali in cui l'armatura si trova (condizioni chimiche e fisiche del calcestruzzo, umidità, % di cloruri,...), permette di risalire alla velocità di corrosione; più alta è la resistenza opposta alla sua polarizzazione, più bassa sa-

rà la velocità di trasmissione della corrente e di conseguenza la velocità di diffusione dei fenomeni di corrosione.

La Tabella 1 riporta una schematizzazione dei livelli di corrosione in funzione del valore di velocità I_{corr} : RAP per il sito di Genova e di 4 lastre tipo FORAP per il sito di Torino.

Livello di corrosione	Trascurabile	Basso	Moderato	Alto
I_{corr} (mA/cm ²)	< 0,2	0,2÷0,5	0,5÷1	>1

Table 1. Corrosion levels as a function of the determined corrosion rate values/Livelli di corrosione in funzione dei valori di velocità di corrosione determinata

Le misure in situ della velocità di corrosione e della resistenza di polarizzazione sono state eseguite con il corrosimetro GECOR-6 costituito da due sensori: il primo sensore "A", circolare per la misura di velocità di corrosione, contiene tre elettrodi di Cu/CuSO₄, un controelettrodo centrale, un elettrodo esterno in acciaio inox per determinare il cosiddetto confinamento modulato della corrente; il secondo sensore "B" permette di determinare la resistenza di polarizzazione.

Anche in questo caso, come per la misura del potenziale di corrosione, le misure sono state effettuate considerando una maglia costituita da 3 punti di misura posti a distanza di 40 cm su quattro allineamenti ad intervalli di 30 cm a costituire un reticolo di c.ca 1 mq.

La superficie del calcestruzzo in corrispondenza dei punti di misura è stata preventivamente inumidita per facilitare la conducibilità elettrica e le misure sono state eseguite con entrambi i sensori.

Preliminarmente alle prove si è proceduto alla misura del profilo di carbonatazione per quantificare la profondità dello spessore di calcestruzzo non più passivante nei confronti dell'armatura (pH < 11), a partire dallo strato superficiale più esterno.

Tenuto conto che per stimare la consistenza del processo di carbonatazione si può, in prima approssimazione, utilizzare la legge di diffusione del tipo

$$x = k \cdot t^{1/2}$$

dove x è la profondità di carbonatazione al tempo t e k una costante che dipende dal tipo di calcestruzzo e dagli specifici fattori ambientali, nel seguito, sono riportati i risultati sperimentali ottenuti per ciascuno dei due siti in esame per la profondità di carbonatazione e per la mappatura della velocità di corrosione.

Le tabelle che seguono riassumono tanto i valori determinati con il metodo speditivo della "fenolftaleina" che quelli ottenuti dalle determinazioni di laboratorio del grado pH a tre profondità. La prova è

stata eseguita su tre dischi di calcestruzzo, successivamente macinati in un mulino e diluiti in acqua distillata.

Il ridotto quantitativo del campione ($\phi 50$ mm; sp = 15 mm) di calcestruzzo diluito, potrebbe avere influenzato la determinazione del grado pH per l'incidenza che anche piccole variazioni del diverso tenore di legante, presente in soluzione, possono determinare.

Elemento	Localizzazione	P _{carbonatazione} mm	Cloruri (%)			pH		
			0-15 mm	15-30 mm	30mm-int	0-15 mm	15-30 mm	30mm-int
trave	Pannello PA112	11	--	--	--	--	--	--
trave		14	0,028	0,022	0,02	9,91	11,22	11,72
trave		17	--	--	--	--	--	--
trave		21	0,025	0,023	0,029	10,1	11,15	11,45
trave		12	0,014	0,009	0,016	9,55	10,98	11,84
trave	Pannello PA28	14	--	--	--	--	--	--
trave		15	0,03	0,024	0,021	9,8	10,49	11,32
trave		13	--	--	--	--	--	--
trave	Pannello PAS8	10	0,012	0,02	0,018	9,48	10,85	10,69
trave		10	--	--	--	--	--	--
trave		9	0,01	0,02	0,02	11,08	11,61	11,59

Table 2. The depth of carbonation, the pH level and the percentage of chlorides for "Calata Salumi" - Genova/La profondità di carbonatazione, il grado pH e la percentuale di cloruri per "Calata Salumi" - Genova

Elemento	Localizzazione	P _{carbonatazione} mm	pH		
			0-15 mm	15-30 mm	30mm-int
trave	Lastra A Standard	16	--	--	--
trave		15	8,94	9,13	9,31
trave	Lastra B molto percolata e bagnata	17	--	--	--
trave		14	8,84	9,39	9,81
trave	Lastra C percolata	13	9,07	9,49	10,06
trave		15	--	--	--
trave	Lastra D standard	23	8,89	9,14	9,69
trave		19	--	--	--

Table 3. The depth of carbonation, the pH level and the percentage of chlorides for "Staz.GTT" Torino-Caselle/La profondità di carbonatazione, il grado pH e la percentuale di cloruri per "Staz.GTT" Torino-Caselle

2.2 Misura e mappatura del potenziale di corrosione

I valori di potenziale rilevati in situ sono riferiti ai valori limite della successiva tabella 4, estratta dalla ASTM C 876:2009

Interpreting Test Results: ASTM C 876

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

* CSE = Copper Sulfate Electrode

Table 4. Probability of corrosion in relation to the potential value/Probabilità di corrosione in relazione al valore di potenziale

Dai dati sperimentali ottenuti, dei quali per brevità si richiama la sintesi, si evince che nel caso del sito di "Calata Salumi" a Genova in nessun punto il potenziale è risultato inferiore a 50 mV; fatto che consente di affermare che la probabilità di corrosione nell'armatura delle 6 lastre RAP indagate è di fatto nulla.

**G2- Mappatura potenziale di corrosione (mV)
Pos. 3-4**

	1	2	3
a	74	106	39
b	144	112	106
c	90	105	111
d	75	88	101

**G3- Mappatura potenziale di corrosione (mV)
Pos. 5-6**

	1	2	3
a	101	133	85
b	117	32	126
c	102	107	89
d	97	96	91

Table 5,5a. Corrosion potential values pos. 3-4 and 5-6 Calata Salumi – GE/Valori di Potenziale di corrosione pos. 3-4 e 5-6 Calata Salumi - GE

Nel caso, invece, del sito "Stazione GTT" di Torino, lastre tipo FORAP, le posizioni 3-4 e 5-6, che fin dal rilievo visivo facevano presumere una criticità nei confronti della corrosione, per la evidente presenza sulla superficie di umidità e di sali, hanno restituito valori di potenziale compresi tra -100 e -250 mV con alcuni picchi inferiori a -250 mV, che comportano una probabilità di corrosione bassa;

**G2- Mappatura potenziale di corrosione (mV)
Pos. 3-4**

	1	2	3
a	74	106	39
b	144	112	106
c	90	105	111
d	75	88	101

**G3- Mappatura potenziale di corrosione (mV)
Pos. 5-6**

	1	2	3
a	101	133	85
b	117	32	126
c	102	107	89
d	97	96	91

Table 6,6a. Corrosion potential values pos. 3-4 and 5-6 GTT –TO station/Valori di Potenziale di corrosione pos. 3-4 e 5-6 Stazione GTT –TO

**G1- Mappatura potenziale di corrosione (mV)
Pos. 1-2**

	1	2	3
a	-98,6	-103,4	-96,9
b	-86,2	-103,1	-112
c	-94,1	-106,4	-110,4
d	-92,6	-101,2	-108,4

**G4- Mappatura potenziale di corrosione (mV)
Pos. 7-8**

	1	2	3
a	-45,9	-56,8	-50,1
b	-60,3	-66,9	-37,8
c	-44,3	-75,2	-83,1
d	-61,1	-64,8	-48,9

Table 7,7a. Corrosion pot. values pos. 1-2 and 7-8 GTT-TO station/Valori di Pot. di corrosione pos. 1-2 e 7-8 Stazione GTT-TO

le posizioni 1-2 e 7-8, senza alcuna presenza di umidità o di prodotti della percolazione, sono invece caratterizzate da valori di potenziale compreso tra 50 e -100 mV, quindi con probabilità di corrosione bassissima o assente.

2.3 Misura e mappatura della velocità di corrosione

I valori delle curve di velocità di corrosione (mappatura), vengono riferite ai valori limite della successiva tabella 8, estratta dalla AASHTO TP11-95, 5[^]/2002.

Correlazione tra il livello di degrado e la velocità di corrosione.

Livello di corrosione	trascurabile	bassa	moderata	alta
$i_{lim} (mA/cm^2)$	0,1	0,2 - 0,5	0,5 - 1	1

Table 8. Correlation between degradation level and corrosion rate/Correlazione tra livello di degrado e velocità di corrosione

Le misure sperimentali della velocità di corrosione, nel caso del sito di "Calata Salumi" a Genova, in nessun punto è risultata superiore a 0,1 mA/cm², a conferma del fatto che il livello di corrosione nell'armatura delle 6 lastre RAP indagate può essere ritenuto trascurabile.

**G2- Mappatura velocità di corrosione ($\mu A/cm^2$)
Pos. 3-4**

	1	2	3
a	0,03	0,04	0,08
b	0,06	0,04	0,03
c	0,06	0,03	0,02
d	0,03	0,027	0,022

Table 9. Corrosion rate values pos. 3-4 Calata Salumi – GE/Valori di Velocità di corrosione pos. 3-4 Calata Salumi - GE

Per il secondo sito "Stazione GTT" di Torino Caselle, tutti i punti rilevati sono caratterizzati da valori di velocità di corrosione superiori a 0,1 mA/cm², e sempre inferiori al valore di 0,5 per cui anche in questo caso il livello di corrosione può ritenersi trascurabile.

**G1- Mappatura velocità di corrosione ($\mu A/cm^2$)
Pos. 1-2**

	1	2	3
a	0,137	0,142	0,133
b	0,144	0,149	0,152
c	0,13	0,136	0,144
d	0,132	0,146	0,154

Table 10. Corrosion rate values pos. 3-4 GTT station/Valori di Velocità di corrosione pos. 3-4 Stazione GTT

3 CONCLUSIONI SPERIMENTALI

I risultati ottenuti per il sito “Calata Salumi” di Genova, e richiamati in sintesi, hanno confermato che le strutture indagate, nonostante il lungo periodo trascorso (26 anni) in condizioni severe di esercizio, sono caratterizzate da una profondità di carbonatazione compresa fra 9 e 21 mm, con valori del grado pH crescenti verso l'interno che variano da 9,48 a 11,84.

Anche per il sito “Stazione GTT” di Torino Caselle i risultati hanno confermato che, nonostante il lungo periodo trascorso (22 anni) in condizioni severe di esercizio a causa della non corretta impermeabilizzazione dell'estradosso, la profondità di carbonatazione è compresa fra 13 e 23 mm con valori del grado pH crescenti verso l'interno che variano da 8,84 e 10,06. Le determinazioni di laboratorio del grado pH hanno probabilmente risentito della esiguità del campione e dell'influenza sul valore di prova che piccole variazioni del tenore di legante possono avere avuto. I risultati del grado pH ottenuti hanno restituito valori pressoché costanti, inferiori a 11 nel caso della stazione GTT, ma vale anche per quelli, prossimi ad 11, di Calata Salumi, per spessori anche superiori alla profondità di carbonatazione determinata. L'apparente incongruenza è stata superata dall'esito dell'esame visivo che, in entrambi i casi, ha evidenziato le ottime condizioni dei trefoli scoperti. L'esito delle determinazioni del grado pH per la stazione GTT, ed in misura minore per Calata Salumi, sono pertanto da ricondurre alle ridotte dimensioni, e quantità, dei campioni di prova.

I valori sperimentali ottenuti confermano nei due casi l'ottimo livello di protezione che i calcestruzzi impiegati nelle strutture precomprese esaminate oppongono ai più frequenti fenomeni di degrado del calcestruzzo, generati dalla esposizione ad ambienti aggressivi anche quando sono riconducibili come in questo caso ad un difetto di costruzione.

4 MONITORAGGIO IN ESERCIZIO

L'impiego sempre più diffuso in nuove applicazioni di grandi elementi precompressi, quali le lastre RAP e FORAP sottoposte ad indagine, richiede di approfondire non solo il controllo rigoroso in fase di prefabbricazione ma di estendere le verifiche della risposta strutturale anche in condizioni di esercizio. Alle campagne di indagine sperimentale e laboratoriale, eseguite su base puntuale, descritte nei precedenti paragrafi, risulta strategica la predisposizione di sistemi di *structural health monitoring* (SHM) che consentano di caratterizzare la risposta globale dell'opera sotto carichi di esercizio e nelle condizioni ambientali di costruzione (C. R. Farrar, 2012). Trattandosi di strutture esistenti, è possibile impiegare sistemi di indagine e monitoraggio di tipo diffuso

(*dense sensing*) al fine di ridurre le incertezze di carattere aleatorio e statistico in merito al comportamento strutturale atteso. I sistemi di monitoraggio eseguono processi di raccolta e analisi dei dati con l'obiettivo di valutare le prestazioni strutturali e, conseguentemente, di pianificare le attività di manutenzione, sia preventiva che correttiva, gli interventi di consolidamento necessari. Le informazioni così acquisite consentono di migliorare notevolmente l'accuratezza della previsione delle prestazioni (UNI/TR11634, 2016).

Le strutture sono soggette a fenomeni di deterioramento che progrediscono nel tempo o danneggiamenti di natura accidentale, e che possono interessare componenti strutturali sia su scala locale che globale (TG3.3, 2021). Il deterioramento strutturale è strettamente legato all'aggressività ambientale, e risulta essenziale condurre misure preventive per ridurre al minimo il deterioramento e i suoi effetti in termini di perdita di resistenza e una conseguente riduzione della sicurezza strutturale. Le indagini illustrate nei paragrafi precedenti hanno evidenziato come i calcestruzzi impiegati nelle strutture precomprese esaminate garantiscano un buon livello protetti rispetto ai più comuni fenomeni di degrado del calcestruzzo. Tale considerazione è di notevole importanza nell'analisi degli scenari di degrado più probabili e la loro diffusione/localizzazione sull'elemento strutturale per la valutazione delle soglie di riferimento per il controllo in continuo eseguito dai sistemi di monitoraggio.

In particolare, Sacertis Ingegneria ha sviluppato sistemi di monitoraggio e diagnostica strutturale che si basano sull'installazione di sensori IoT low-cost principalmente a tecnologia MEMS, collegati ad una unità locale (centralina) di raccolta dati che ha il compito di eseguire un primo pre-processing delle informazioni e controlli in semi-real time, e di inviare i dati al Cloud per storage e successive analisi di medio-lungo termine (Alovisi, Darò, Mancini, & et al, 2022)). La disponibilità di un maggior numero di sensori e della conseguenza ridondanza dei punti di misura consente di recuperare contenuti informativi strutturali rappresentativi del comportamento globale della struttura. La possibilità di simulare la risposta strutturale reale con un Modello agli Elementi Finiti e di aggiornarlo, sulla base di misurazioni registrate in loco, permette di tarare i parametri meccanici del modello per rappresentare il comportamento strutturale effettivo delle strutture esistenti e di definire i livelli di soglia che consentono di intervenire quando le condizioni divergono dagli andamenti standard. Gli allarmi sono generati attraverso un confronto continuo dei segnali misurati, analizzati e aggregati per rappresentare informazioni strutturali, con livelli di allarme pre-identificati. In questa direzione, i dati raccolti dovrebbero alimentare adeguati *key performance indicators* e dovrebbero servire come input per le procedure diagnostiche strutturali. Tali

aspetti sono oggetto di studio a livello europeo al fine di raggiungere una armonizzazione degli approcci di monitoraggio e diagnostica (Darò, et al., 2022).

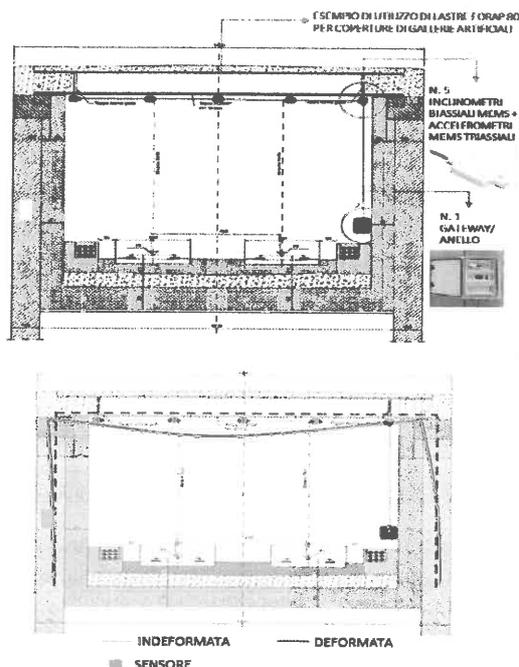


Figure 7. Example of structural monitoring applied to FORAP 80 slabs in case of use for roofing of artificial tunnels/Esempio di monitoraggio strutturale applicato alle lastre FORAP 80 in caso di utilizzo per coperture di gallerie artificiali.

In particolare, come mostrato in Figura 7, nel caso di utilizzo di lastre FORAP 80, è stato oggetto di studio un caso applicativo di installazione del sistema di monitoraggio strutturale Sacertis per utilizzo delle lastre precomprese come sistema di copertura di gallerie artificiali.

La proposta prevede l'installazione di catene precablate di sensori inclinometrici ed accelerometrici MEMS con una soluzione ad anelli indipendenti con n.1 centralina di raccolta dati per ciascuna sezione di monitoraggio, per garantire flessibilità di posizionamento e numero di sezioni sottoposte a controllo sulla base delle esigenze progettuali. Il sistema di monitoraggio, installato in fase di costruzione della copertura della galleria artificiale, consente di controllare la deformata sotto carico permanente al momento del collaudo strutturale, fornendo informazioni indispensabili alla validazione della risposta statica alla prima presa di carico. In particolare, data la geometria costruttiva, l'obiettivo del sistema di monitoraggio sia in fase di costruzione che in esercizio, è quello di verificare la risposta nel tempo delle lastre di copertura sottoposte agli agenti esterni ed ai fenomeni di degrado, e di verificare il grado di vincolo del nodo di connessione tra la lastra e la paratia nel tempo. Una ulteriore possibile estensione del sistema di controllo per le lastre precomprese FORAP 80 consiste nello studio della pre-installazione di sensori di pressione annegati nella struttura in fase di getto, al fine di ottenere un controllo diretto ed in

continuo delle tensioni sviluppate nel componente strutturale.

5 CONSIDERAZIONI SULLA DURABILITÀ ELEMENTI CELLULARI CON PRECOMPRESSIONE PRE-TESA

La durabilità dell'opera è influenzata da molti fattori: dai materiali di costruzione, alle ipotesi progettuali, alle modalità esecutive ed infine dalla gestione/manutenzione.

In quanto alla garanzia di durabilità, considerando che la forma più comune di deterioramento sugli impalcati in calcestruzzo in ambiente chiuso è sicuramente data dalla corrosione delle armature a seguito della carbonatazione del calcestruzzo, si precisa che i fenomeni di carbonatazione che intervengono sul lungo periodo hanno effetti meno penalizzanti su travi a trefoli pre-tesi piuttosto che su travi in armatura lenta, in quanto i valori di copriferro per travi a trefoli sono tipicamente maggiori che quelli delle travi in armatura lenta. Questo determina una vita utile intrinsecamente maggiore all'elemento, che beneficia anche dal regime di compressione, ovvero l'assenza di regime fessurato che solitamente nel CAO rappresenta un percorso preferenziale per il contatto con l'aria e quindi l'incremento di velocità di carbonatazione o la maggiore facilità di ingresso di ioni aggressivi (solfati, cloruri, etc...).)

Per quanto riguarda i fenomeni di degrado e difetti che intervengono invece sul breve periodo (come potrebbero essere eventualmente un carente mix design del calcestruzzo, una non corretta posa in opera del getto di completamento in cls sopra le travi, un difetto di progettazione, ...) è evidente che una trave in armatura pre-tesa ha prestazioni migliori di una trave ad armatura lenta sia perché il processo di costruzione è sottoposto a rigidi controlli di qualità sia perché la precompressione richiede prestazioni maggiori ai calcestruzzi.

In aggiunta, considerando la forma "cellulare" che hanno le travi FORAP, con l'aggiunta della cappa superiore collaborante in calcestruzzo armato e con la completa solidarizzazione delle stesse tramite getto in c.a. all'appoggio laterale, questo tipo di impalcato è di fatto molto rigido e con una struttura quasi equivalente a quella di impalcati "a cassone", che danno grandi garanzie di durabilità e di risorse di rigidità torsionale che, sebbene trascurate in fase di progettazione, costituiscono sicuramente un valore aggiunto alle capacità di resistenza nel tempo di questi impalcati.

6 CONCLUSIONI

L'esecuzione di strutture prefabbricate in calcestruzzo armato precompresso, ad armature pre-tese

con sezione tipo le grandi lastre alveolari FORAP, ha consentito la realizzazione di strutture orizzontali di piano che costituiscono un esempio di riferimento da più di 35 anni nell'ambito dell'edilizia e delle infrastrutture, come ad esempio solai di parcheggio/edifici e solette di copertura per gallerie artificiali. Gli studi sperimentali illustrati nella presente memoria hanno evidenziato ottime caratteristiche di mantenimento delle proprietà a lungo termine dei manufatti, anche in condizioni ambientali sfavorevoli. Questo evidenzia notevoli vantaggi di durabilità, ad esempio con riferimento a strutture in calcestruzzo armato normale.

L'applicazione della precompressione pre-tesa unita alla particolare tecnica costruttiva con "estrusione" della sezione di calcestruzzo alveolare consente un elevato livello di industrializzazione del processo di realizzazione dei manufatti garantendo obiettivi sempre più apprezzati nelle attuali costruzioni in termini di modularità / assemblaggio / velocità di esecuzione e robustezza. Tali qualità oltre alla garanzia di elevata omogeneità del calcestruzzo (tramite vibro finitrici) rappresenta una importante opportunità nell'ambito del rinnovo e/o la realizzazione del patrimonio delle infrastrutture in Italia.

E' evidente che la ricerca di soluzioni ad alto contenuto industriale di elementi prefabbricati, come succede similmente nei conci prefabbricati nello scavo meccanizzato delle gallerie metropolitane, rappresenta una sfida per i prossimi anni in Italia nell'ambito del PNRR dove anche per motivi di stringenti tempistiche esecutive la necessità di prefabbricazione delle infrastrutture risulta una strada obbligata. L'evoluzione della tecnologia dei calcestruzzi unita ai dettagli costruttivi più aggiornati consente pertanto l'impiego di queste soluzioni strutturali prefabbricate nelle infrastrutture, anche sposando tecniche di monitoraggio avanzato e quindi ottenendo soluzioni durevoli e modulari con possibilità quindi di minimizzare la manutenzione e favorire future manutenzioni in termini modulari (di singolo elemento strutturale e non di globalità, come tutte le strutture in calcestruzzo gettate in opera).

The execution of prefabricated structures in prestressed reinforced concrete, with hollow core section as FORAP elements, has allowed the application of horizontal floor structures which have been a reference example for more than 35 years in the field of buildings and infrastructures, such as parking / building floors and roof slabs for artificial tunnels. The experimental studies illustrated in the present report have highlighted excellent characteristics of maintaining the long-term properties of such precast prestressed elements, even in unfavorable environmental conditions. This highlights considerable advantages of durability, for example with reference to normal reinforced concrete structures.

The application of pre-tensioned prestressing combined with the particular construction technique with "extrusion" of the hollow concrete section allows a high level of industrialization of the manufacturing process of the precast elements, guaranteeing increasingly appreciated objectives in current constructions in terms of modularity / assembly / speed of execution and robustness. These qualities, in addition to the guarantee of high homogeneity of the concrete (through vibro/finishing machines), represent an important opportunity in the context of the renewal and / or construction of the infrastructure works in Italy.

It is evident that the search for solutions with a high industrial content of prefabricated elements, as similarly occurs in the prefabricated segments in the mechanized excavation of metropolitan tunnels, represents a challenge for the coming years in Italy in the context of the PNRR where also for reasons of stringent execution times the need for prefabrication of infrastructures is an obligatory path. The evolution precast concrete technology combined with the most up date manufacturing and construction aspects therefore allows the use of these prefabricated structural solutions in infrastructures, also by marrying advanced monitoring techniques and therefore obtaining durable and modular solutions with the possibility of minimizing maintenance. and encourage future maintenance in modular terms (of a single structural element and not of the whole, like all concrete structures cast on site).

7 BIBLIOGRAFIA

- Alovisi, I., Darò, P., Mancini, G., & et al. (2022). New Sensor Nodes, Cloud, and Data Analytics: Case Studies on Large Scale SHM Systems. In R. D. Cury A., *Structural Health Monitoring Based on Data Science Techniques. Structural Integrity* (p. 457-484). Springer, vol 21.
- C. R. Farrar, K. W. (2012). *Structural Health Monitoring*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- Darò, P., Longo, M., Mancini, G., Negri, S., Bigajvan Vliet, A., & Allaix, D. (2022). Data-informed safety assessment of concrete structures. *fib Congress*. Oslo.
- TG3.3, f. (2021). Existing Concrete Structures Life Management, Testing and Structural Health Monitoring. *fib bulletin*.
- UNI/TR11634. (2016). Linee guida per il monitoraggio strutturale. Italia.
- Alovisi, I., Darò, P., Mancini, G., & et al. (2022). New Sensor Nodes, Cloud, and Data Analytics: Case Studies on Large Scale SHM Systems. In R. D. Cury A., *Structural Health*

- Monitoring Based on Data Science Techniques. Structural Integrity (p. 457-484). Springer, vol 21.
- C. R. Farrar, K. W. (2012). Structural Health Monitoring. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- Darò, P., Longo, M., Mancini, G., Negri, S., Bigajvan Vliet, A., & Allaix, D. (2022). Data-informed safety assessment of concrete structures. fib Congress. Oslo.
- TG3.3, f. (2021). Existing Concrete Structures Life Management, Testing and Structural Health Monitoring . fib bulletin.
- UNI/TR11634. (2016). Linee guida per il monitoraggio strutturale. Italia.
- Eurocodice 2 – PROGETTAZIONE DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO - UNI EN 1992- Parte 1-3 - Regole generali - Elementi e strutture prefabbricate in calcestruzzo;
- Eurocodice 2 – PROGETTAZIONE DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO - UNI EN 1992- 1-1:2005 Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici
- E. Proverbio, G. Proietti, V.D. Venturi Life Prediction and Aging Management of Concrete Structures. RILEM (2003).
- E. Proverbio, G. Laganà, V.D. Venturi. Integrated Life-time Engineering of Building and Civil Infrastructures ILCDES 2003. Kuopio.
- E. Proverbio, V.D. Venturi. Integrated Reliability of nondestructive tests for on site concrete strength assessment. 10 DBMC (2005).