



POLITECNICO
MILANO 1863

DIPARTIMENTO DI
INGEGNERIA CIVILE E
AMBIENTALE

**CONSULENZA TECNICA RELATIVA ALLA VALUTAZIONE
DELLA RESISTENZA ALLA CARBONATAZIONE ED ALLA
PENETRAZIONE DEI CLORURI DI CALCESTRUZZI
ADDITIVATI CON ADDITIVO CRISTALLINO**

Prof. Ing. Liberato Ferrara

Firmato digitalmente ai sensi del CAD - D.Lgs 82/2005 e s. m. e i., art. 21 c.1-2



POLITECNICO
MILANO 1863

INDICE

PREMESSA.....	3
1. PROVE DI PENETRAZIONE DELLA CARBONATAZIONE.....	4
2. PROVE DI DIFFUSIONE NATURALE DEI CLORURI.....	10
3. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	16



PREMESSA

La presente relazione si riferisce alla valutazione della resistenza alla carbonatazione ed alla diffusione naturale dei cloruri misurata su provini cubici confezionati con calcestruzzo ordinario e calcestruzzo additivato con Penetron Admix. Sulla base delle dichiarazioni del committente Penetron Italia trattasi in entrambi i casi di calcestruzzo classe C32/40 la cui composizione è stata progettata per classi di esposizione **XC2, XA1, XS1**, attesa la destinazione d'uso e la collocazione della struttura. I provini oggetto delle prove sono stati confezionati in data 17 e 18 marzo 2022, rispettivamente per il calcestruzzo ordinario e per quello additivato, contestualmente alla realizzazione delle strutture del nuovo depuratore DAC di Genova, e mantenuti esposti all'ambiente atmosferico del sito fino alla data della prova. Complessivamente sono stati realizzati 10 provini cubici, di lato pari a 150 mm, con calcestruzzo ordinario, e 10 provini cubici, sempre di lato pari a 150 mm, con calcestruzzo additivato con Penetron Admix. La composizione dei calcestruzzi, non nota allo scrivente, è quella indicata dalla committenza e dalla direzione lavori per la realizzazione delle strutture di cui sopra.

A cura dello scrivente, sono stati prelevati, in data 23 giugno, 15 settembre e 14 dicembre 2022, quindi approssimativamente dopo 3, 6 e 9 mesi di esposizione alle naturali condizioni di esercizio della struttura stessa, rispettivamente 3 campioni di calcestruzzo ordinario e 3 di calcestruzzo additivato, per ciascuna data di prelievo. Sui campioni, portati presso il Laboratorio Prove Materiali Strutture e Costruzioni di Politecnico di Milano, sono state eseguite, nell'ambito di una tesi di laurea e di una tesi di dottorato, misure di penetrazione della carbonatazione (a seguito, come detto di esposizione naturale) e misure di penetrazione dei cloruri a seguito della diffusione naturale. Le prove sono state eseguite con il metodo della fenolftaleina, per quanto riguarda la penetrazione del fenomeno di carbonatazione, e del nitrato di argento, per quanto riguarda la diffusione naturale dei cloruri.

I risultati sono riportati nel seguito.



1. PROVE DI PENETRAZIONE DELLA CARBONATAZIONE

Le prove di penetrazione del fenomeno della carbonatazione sono state eseguite su provini cubici, esposti al medesimo scenario di servizio della struttura, dopo 3, 6 e 9 mesi.

Ciascun provino cubico è stato dapprima diviso in due metà mediante prova di splitting; sulla sezione fessurata di una delle due metà così ottenute, si è applicata la soluzione di fenolftaleina (l'altra metà del provino cubico è stata utilizzata per la misura del fronte di diffusione dei cloruri). Successivamente alla acquisizione delle immagini delle superficie spruzzate, il campione è stato ulteriormente suddiviso in due, sempre mediante prova di splitting, ripetendo la operazione di spruzzo della soluzione di fenolftaleina su ciascuna delle due nuove superficie di frattura così ottenute.

Le superficie di frattura trattate come sopra sono state quindi fotografate e mediante software di analisi dell'immagine si è determinato il valore medio di penetrazione del fronte carbonatato. Dapprima, con riferimento a ciascun lato della sezione oggetto di analisi, si è determinata, mediante il software di analisi dell'immagine, l'area media del fronte carbonatato, ottenendo quindi il valore medio della penetrazione del fronte stesso come rapporto fra l'area, calcolata come sopra, e la lunghezza del lato. I valori sono stati quindi mediati per ciascun provino, come sintetizzato in Tabella 1.

Tempo	x_c (mm)	
	Calcestruzzo ordinario	Calcestruzzo additivato con Penetron Admix
3 mesi	3.82 mm	1.71 mm
6 mesi	3.92 mm	2.54 mm
9 mesi	4.32 mm	3.05 mm

Tabella 1. Valor medio di penetrazione del fronte di carbonatazione x_c (mm)

Sulla base dei risultati così ottenuti è stato calcolato, mediante la relazione

$$x_c = k \sqrt{t}$$

il valore del rateo di carbonatazione ($\text{mm/anni}^{0.5}$); i risultati sono indicati in tabella 2.

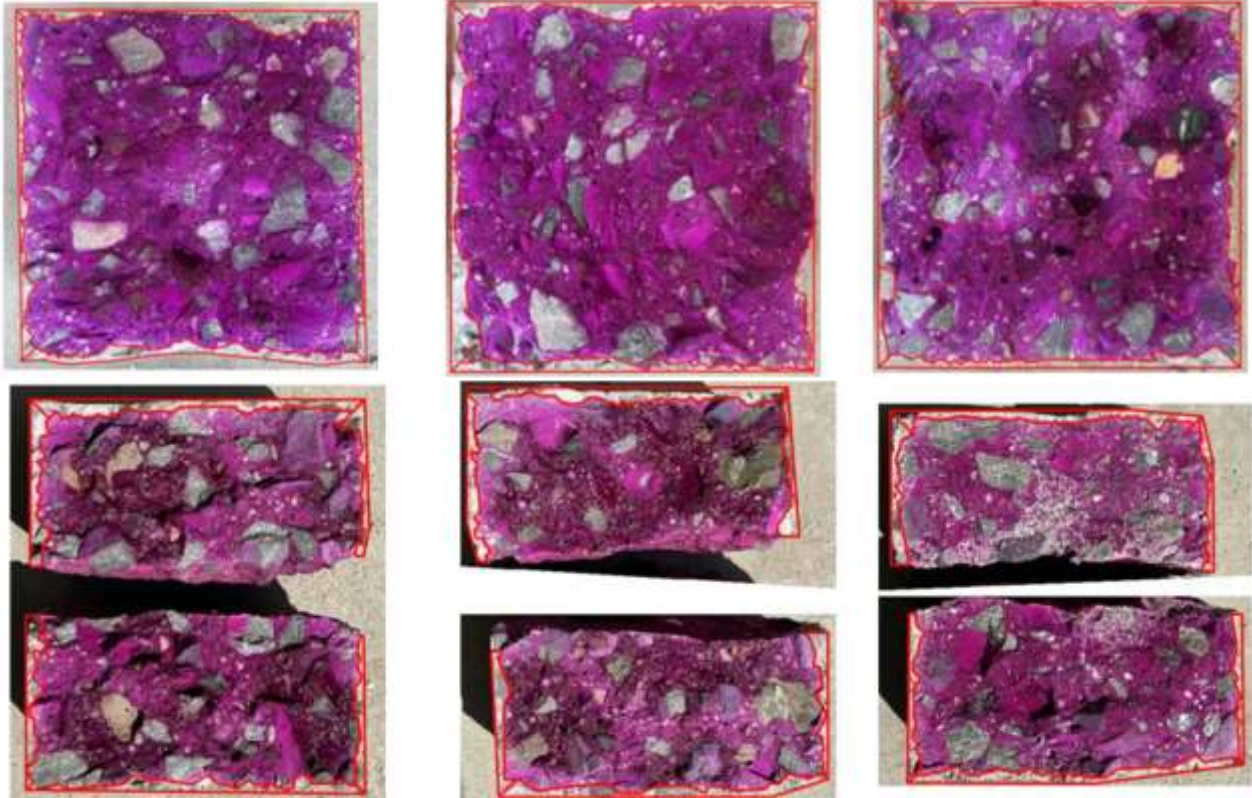
Tempo	k ($\text{mm/anni}^{0.5}$)	
	Calcestruzzo ordinario	Calcestruzzo additivato con Penetron Admix
6 mesi	3.53	6.23
9 mesi	3.53	5.61

Tabella 2. Valor medio del rateo di carbonatazione k ($\text{mm/anni}^{0.5}$)

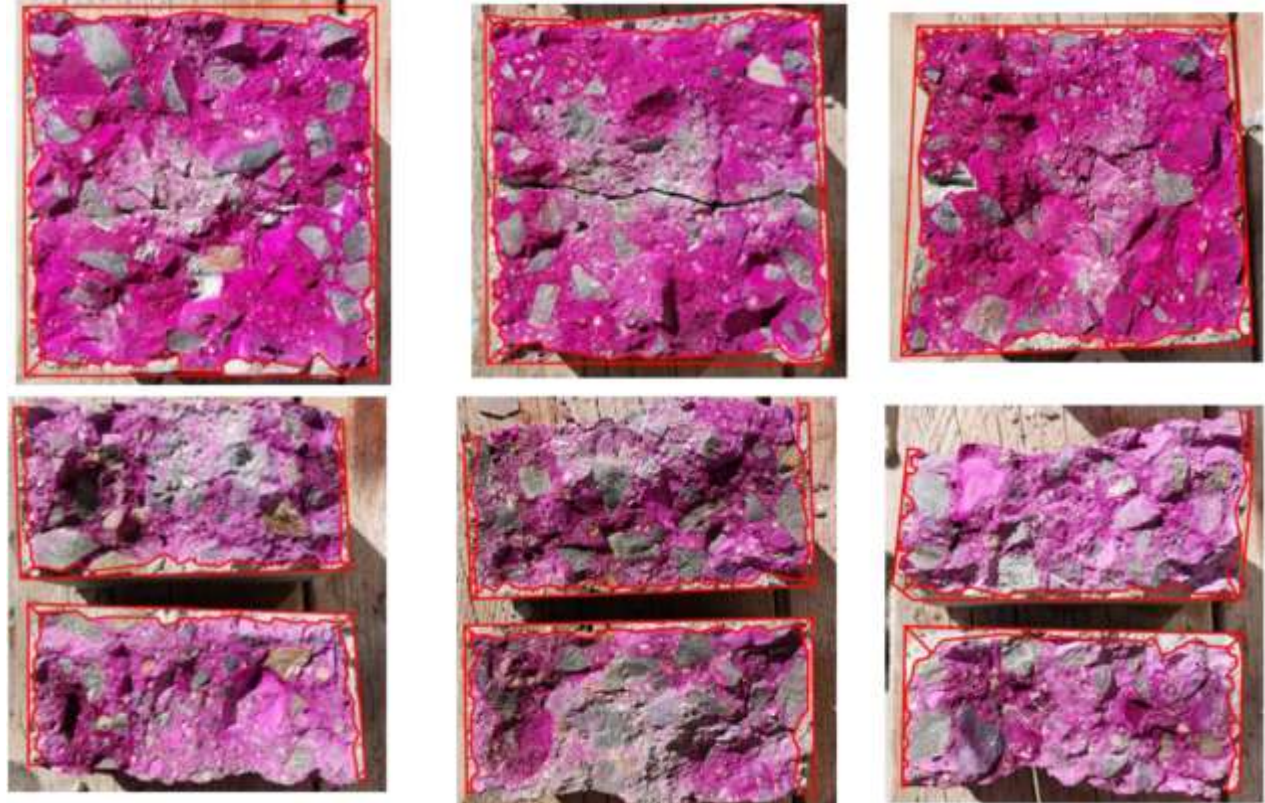
La Figure 1 e 2 mostrano le varie superficie di frattura dei campioni a seguito del trattamento con fenolftaleina.



Calcestruzzo ordinario – esposizione 3 mesi



Calcestruzzo ordinario – esposizione 6 mesi





Calcestruzzo ordinario – esposizione 9 mesi

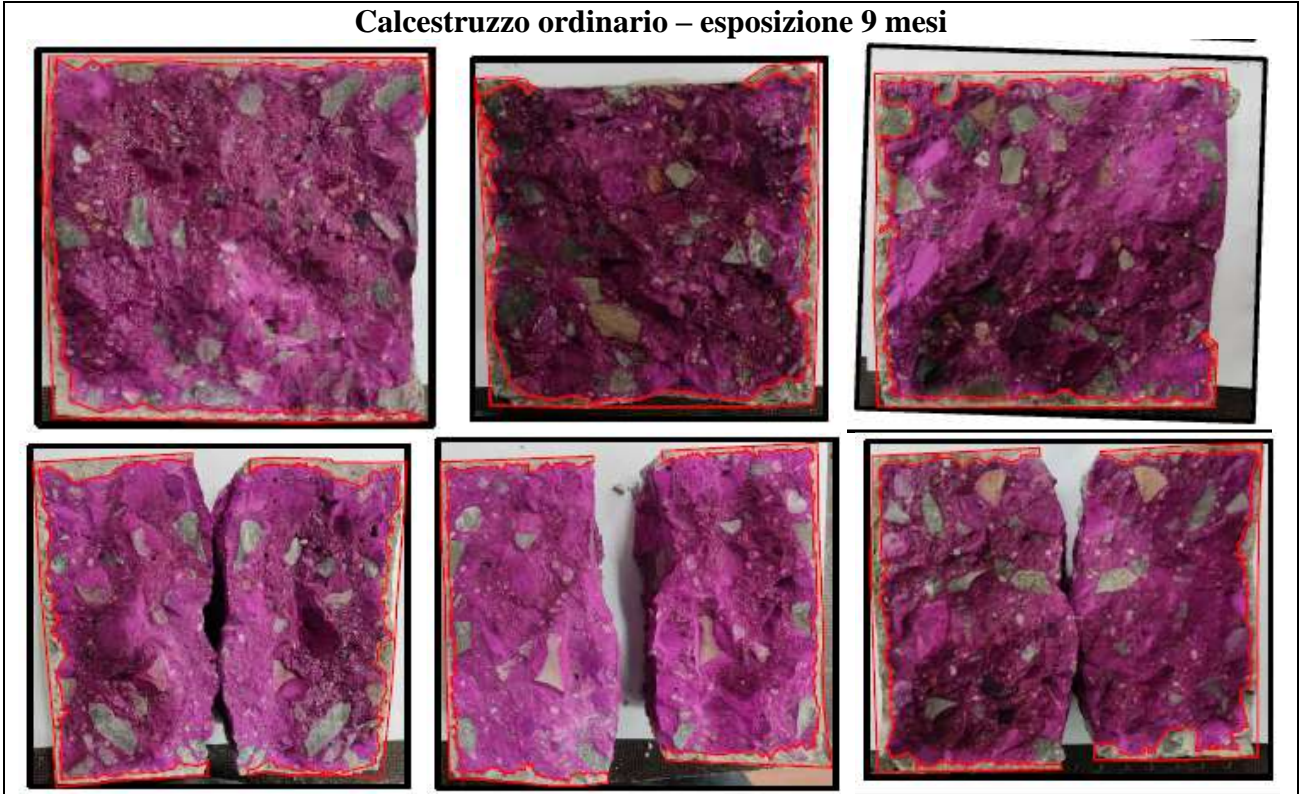
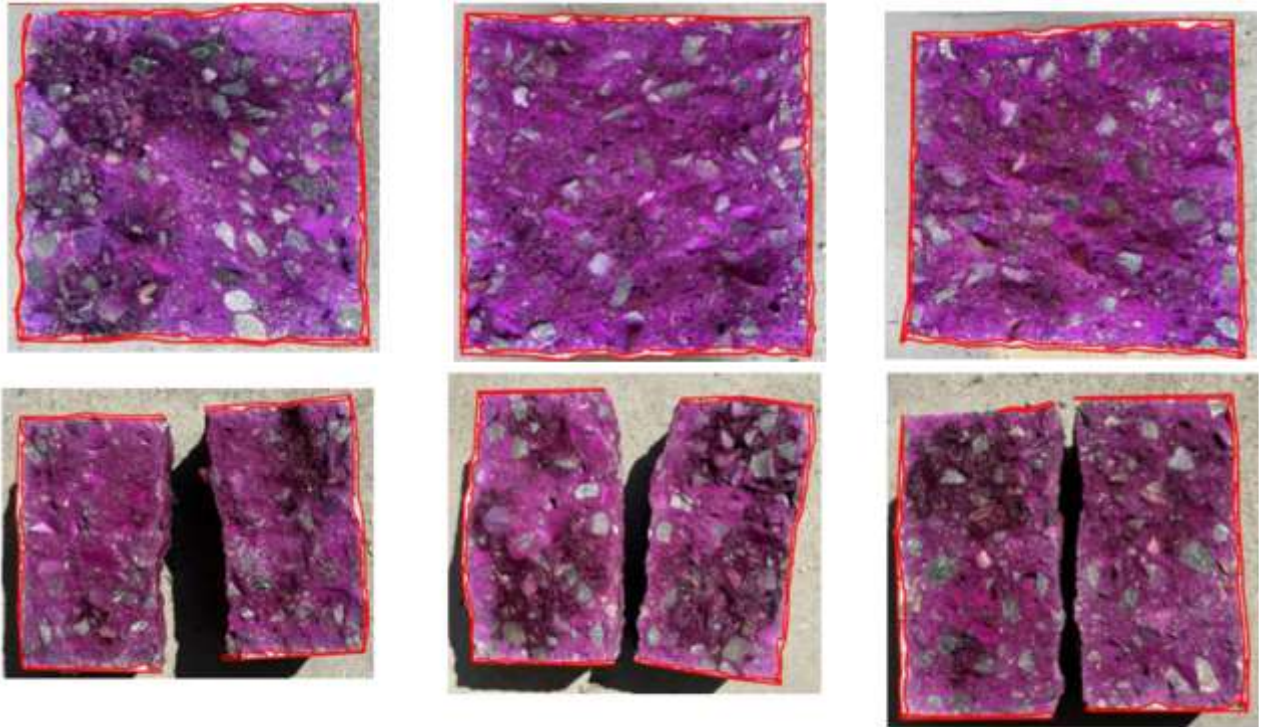


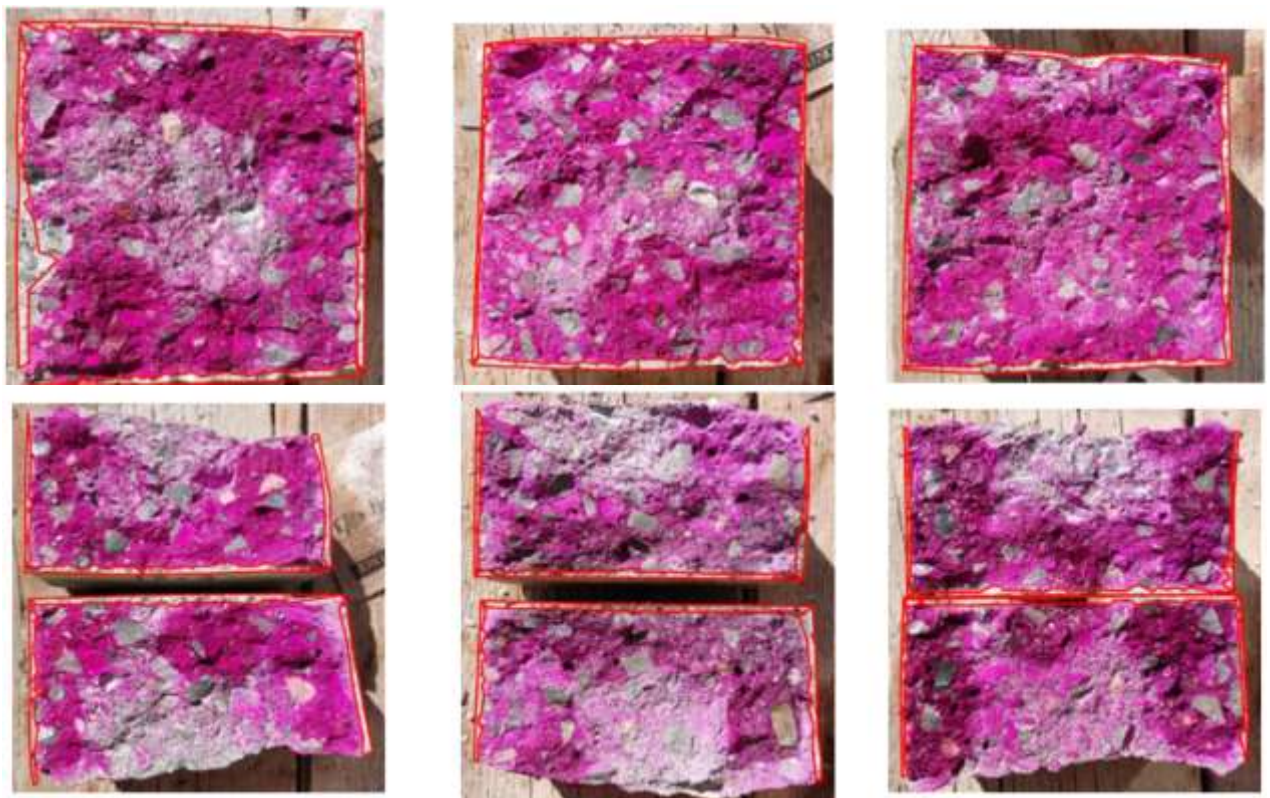
Figura 1. Provini realizzati con calcestruzzo ordinario – prove di profondità della carbonatazione mediante metodo della fenolftaleina.



Calcestruzzo additivato con Penetron Admix – esposizione 3 mesi



Calcestruzzo additivato con Penetron Admix – esposizione 6 mesi





Calcestruzzo additivato con Penetron Admix – esposizione 9 mesi

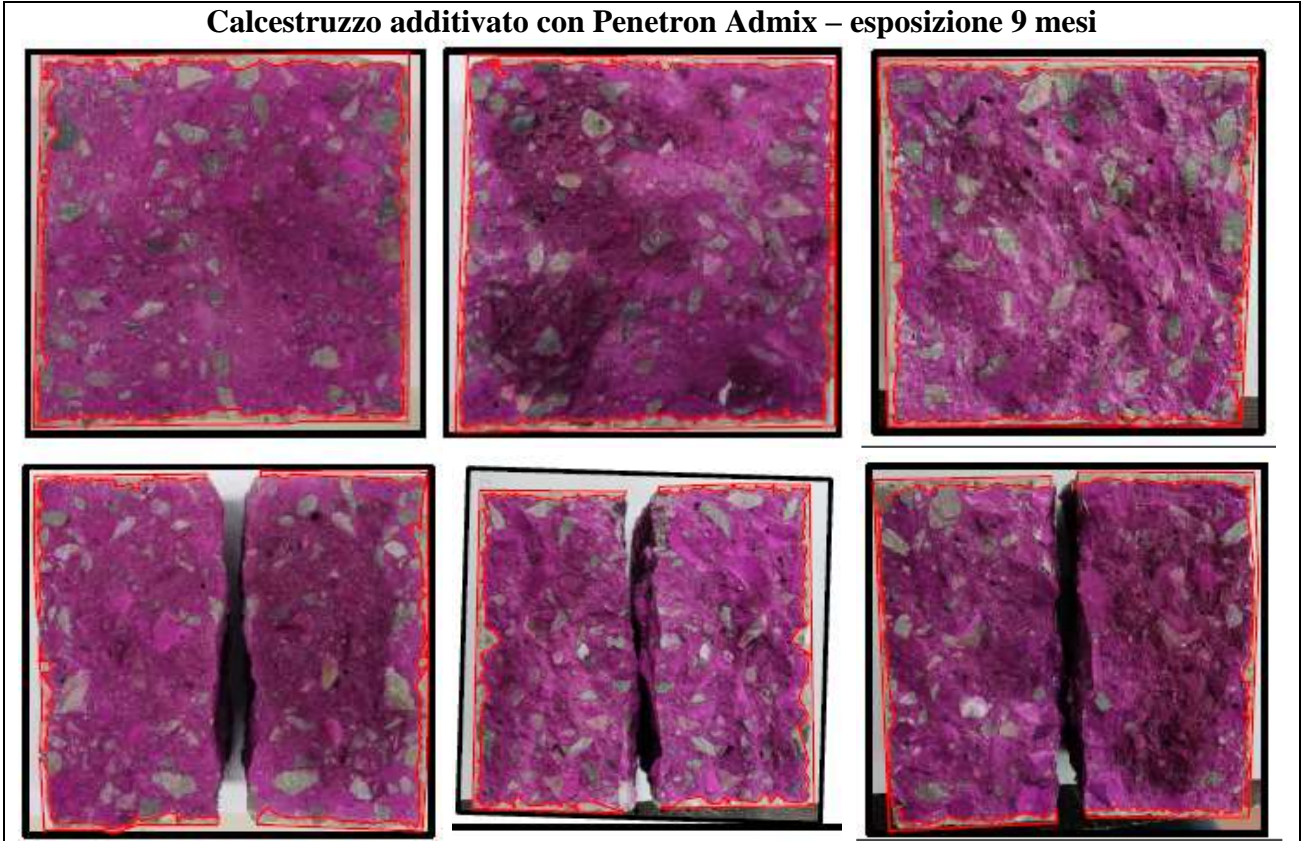


Figura 2. Provini realizzati con calcestruzzo additivato con Penetron Admix® – prove di profondità della carbonatazione mediante metodo della fenolftaleina.



Sulla base dei risultati così ottenuti il fenomeno della carbonatazione è stato “estrapolato” nel tempo, ottenendosi così dei grafici, illustrati in Figura 3, che consentono di prevedere il tempo, in anni, necessario affinché il fronte carbonatato raggiunga il livello delle armature.

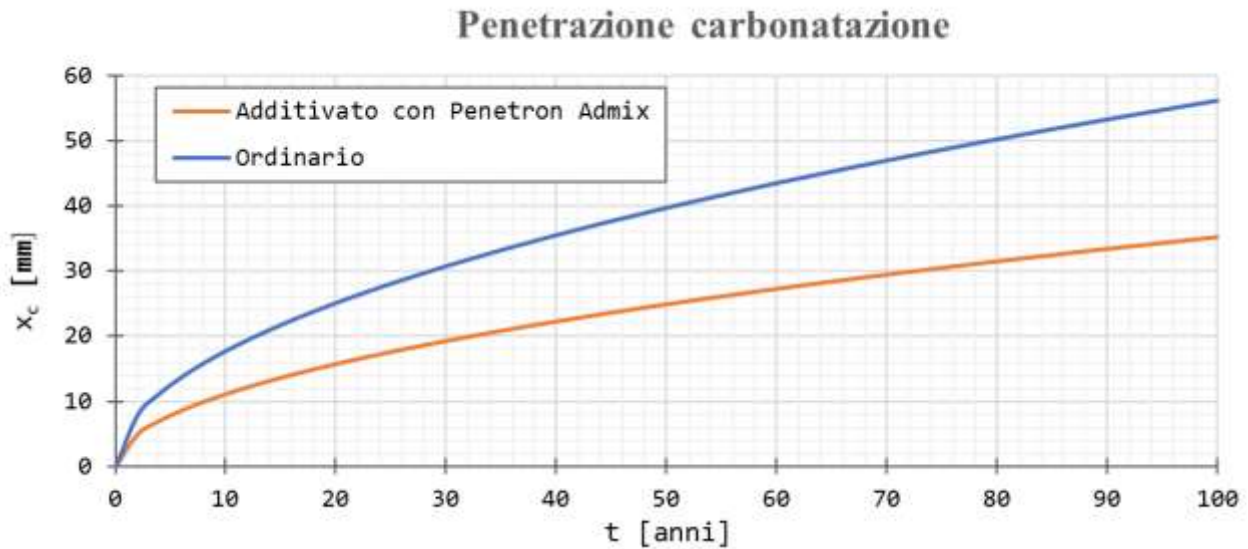


Figura 3. Evoluzione del fronte di carbonatazione nel tempo, sulla base dei risultati delle prove sperimentali sintetizzati in Tabella 1 e 2.

2. PROVE DI DIFFUSIONE NATURALE DEI CLORURI

Le prove di diffusione naturale dei cloruri (esposizione aerea) sono state eseguite su provini cubici, esposti al medesimo scenario di servizio della struttura, dopo 3, 6 e 9 mesi.

Ciascun provino cubico è stato dapprima diviso in due metà mediante prova di splitting; sulla sezione fessurata di una delle due metà così ottenute, si è applicata la soluzione di nitrato di argento (l'altra metà del provino cubico è stata utilizzata per la misura del fronte di carbonatazione). Successivamente alla acquisizione delle immagini delle superficie spruzzate, il campione è stato ulteriormente suddiviso in due, sempre mediante prova di splitting, ripetendo la operazione di spruzzo della soluzione di nitrato su ciascuna delle due nuove superficie di frattura così ottenute.

Le superficie di frattura trattate come sopra sono state quindi fotografate e mediante software di analisi dell'immagine si è determinato il valore medio di penetrazione del fronte di diffusione dei cloruri. Dapprima, con riferimento a ciascun lato della sezione oggetto di analisi, si è determinata, mediante il software di analisi dell'immagine, l'area media del fronte di diffusione dei cloruri, ottenendo quindi il valore medio della penetrazione del fronte stesso come rapporto fra l'area, calcolata come sopra, e la lunghezza del lato. I valori sono stati quindi mediati per ciascun provino, come sintetizzato in Tabella 3.

Tempo	x_{Cl} (mm)	
	Calcestruzzo ordinario	Calcestruzzo additivato con Penetron Admix
3 mesi	1.25 mm	0.98 mm
6 mesi	2.29 mm	1.13 mm
9 mesi	3.05 mm	2.11 mm

Tabella 3. Valor medio di penetrazione del fronte di diffusione dei cloruri x_{Cl} (mm)

Sulla base dei risultati così ottenuti è stato calcolato, mediante la seconda legge di Fick, il valore medio del coefficiente di diffusione apparente (m^2/s), i cui valori sono indicati in Tabella 4.

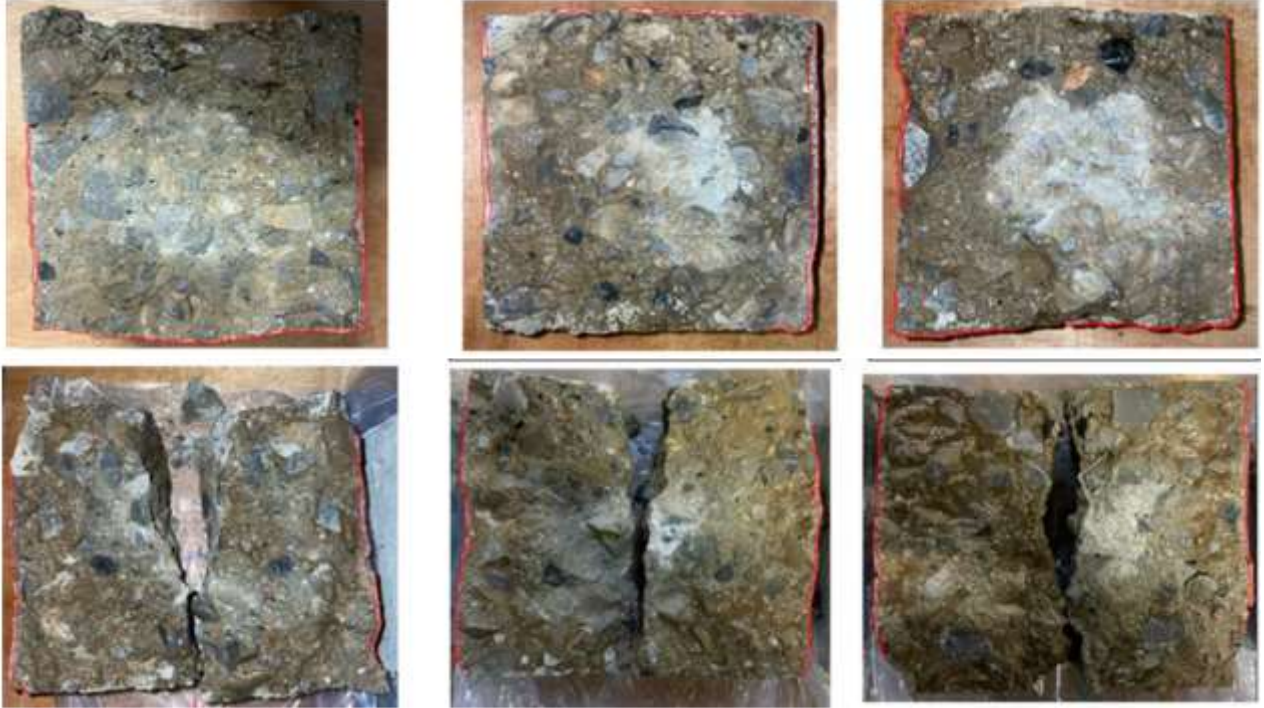
Tempo	D_{app} (m^2/s)	
	Calcestruzzo ordinario	Calcestruzzo additivato con Penetron Admix
6 mesi	3.4×10^{-13}	9.0×10^{-13}
9 mesi	4.6×10^{-13}	1.1×10^{-12}

Tabella 2. Valor medio del coefficiente di diffusione apparente dei cloruri (m^2/s)

La Figure 4 e 5 mostrano le varie superficie di frattura dei campioni a seguito del trattamento con fenolftaleina.



Calcestruzzo ordinario – prove di esposizione a 3 mesi



Calcestruzzo ordinario – prove di esposizione a 6 mesi





Calcestruzzo ordinario - prove di esposizione a 9 mesi

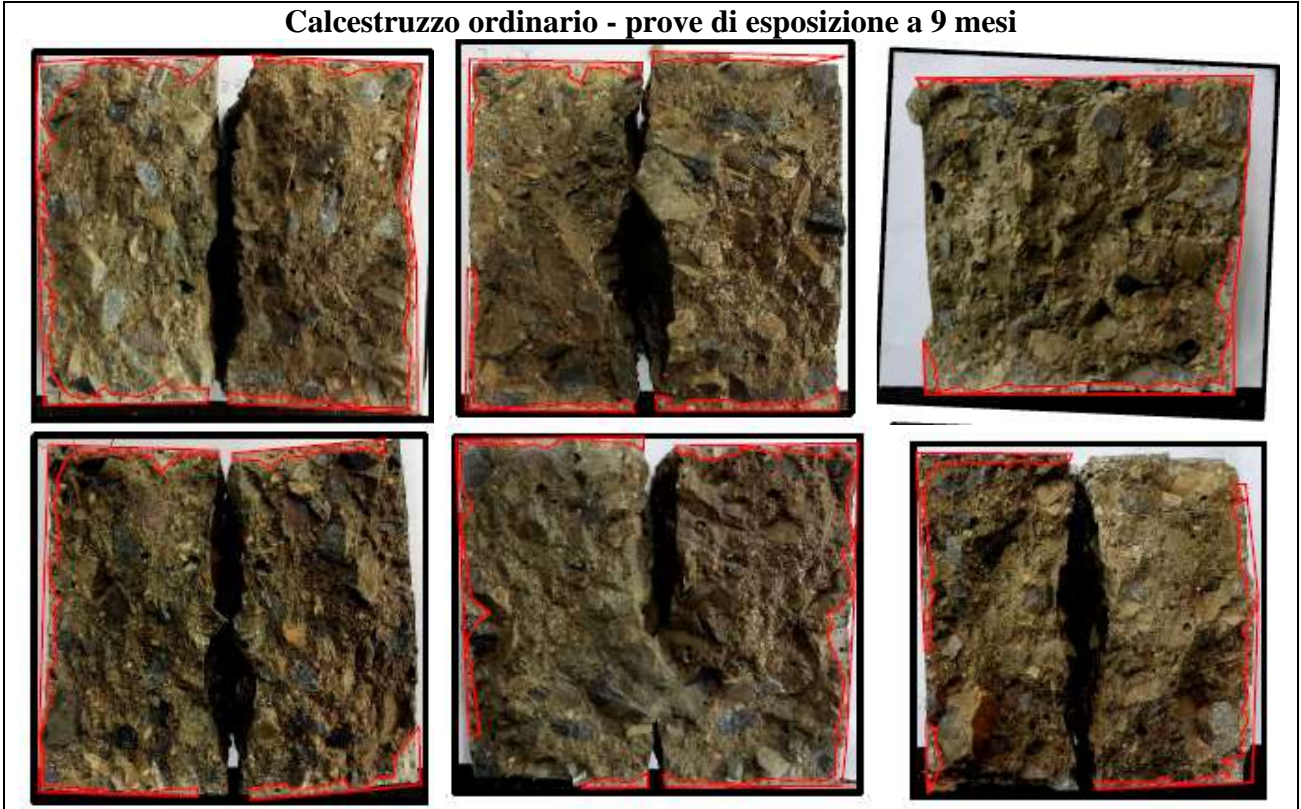
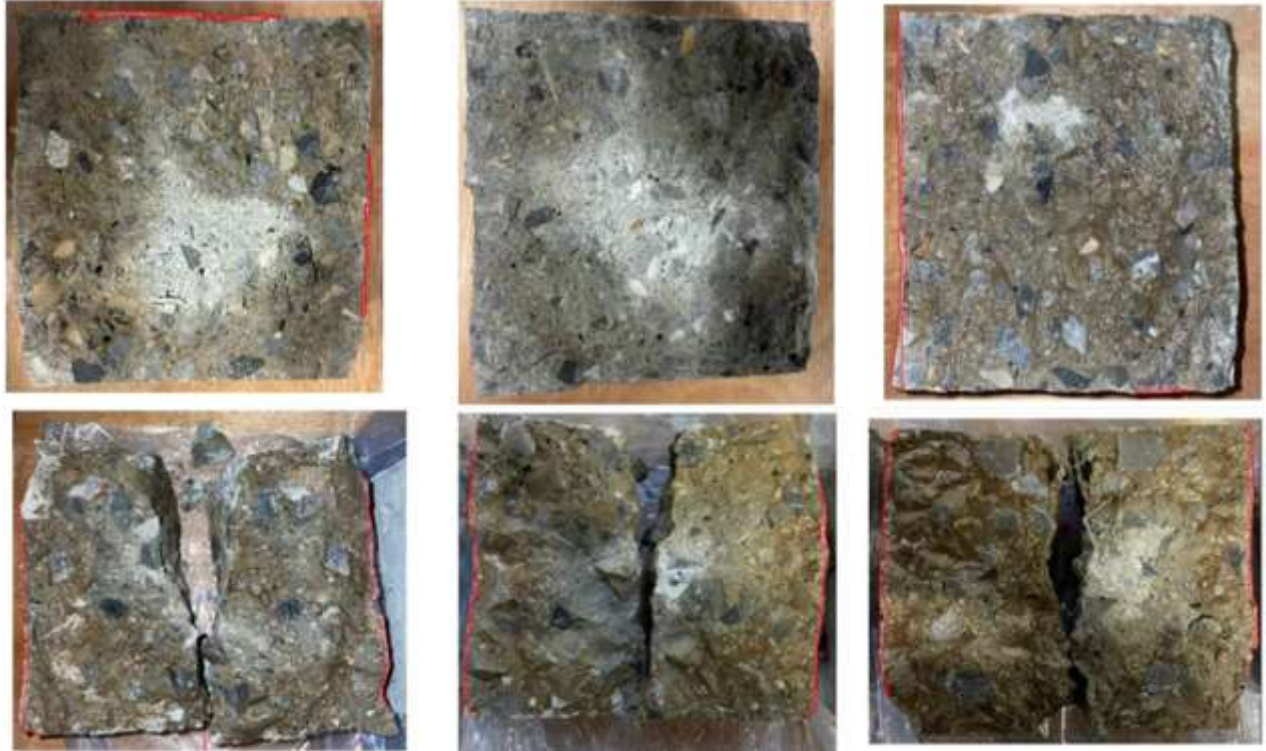


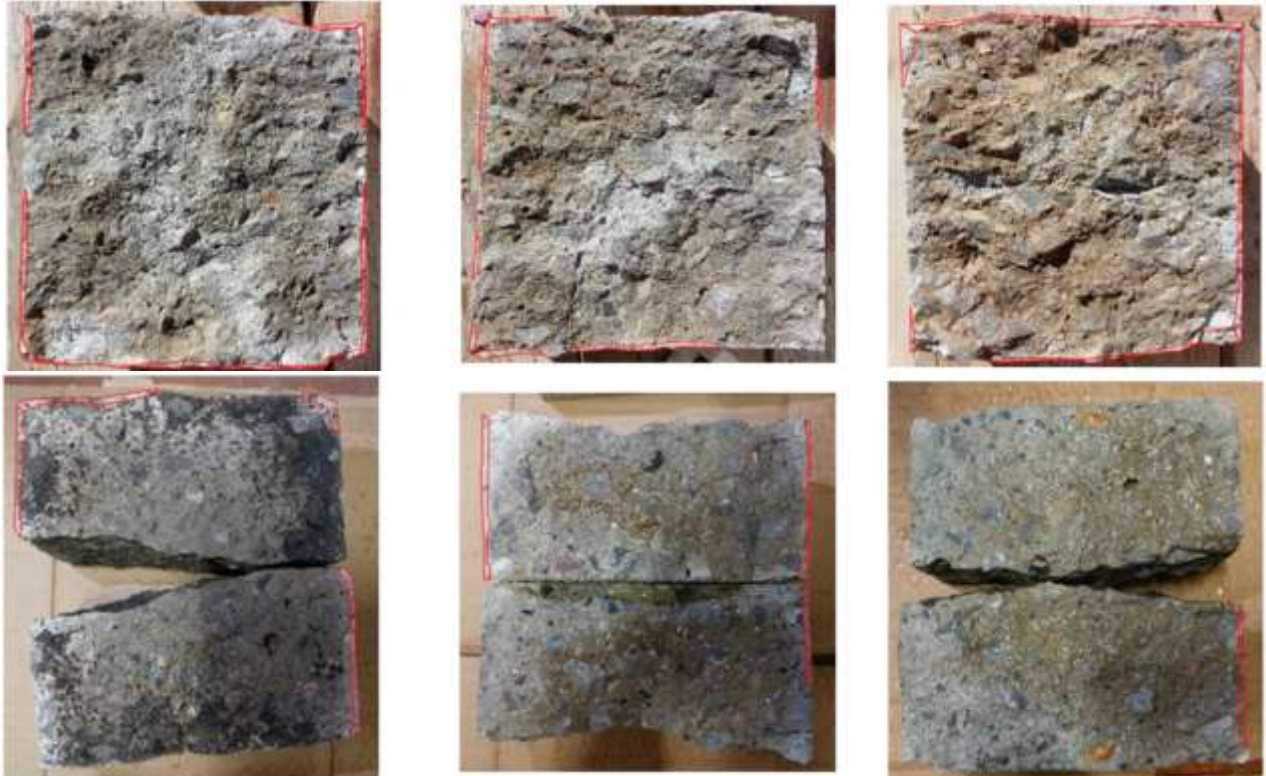
Figura 4. Provini realizzati con calcestruzzo ordinario – prove di diffusione naturale dei cloruri – metodo del nitrato di argento



Calcestruzzo additivato con Penetron Admix® – prove di esposizione a 3 mesi



Calcestruzzo additivato con Penetron Admix® – prove di esposizione a 6 mesi





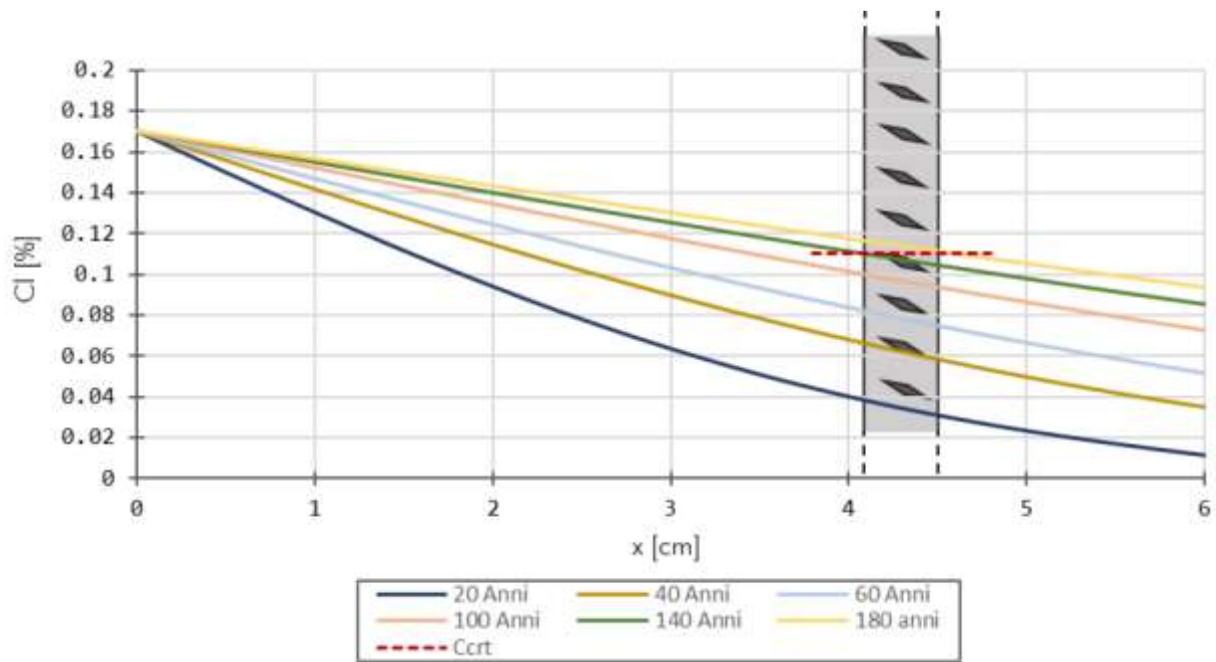
Calcestruzzo additivato con Penetron Admix ® - prove di esposizione a 9 mesi



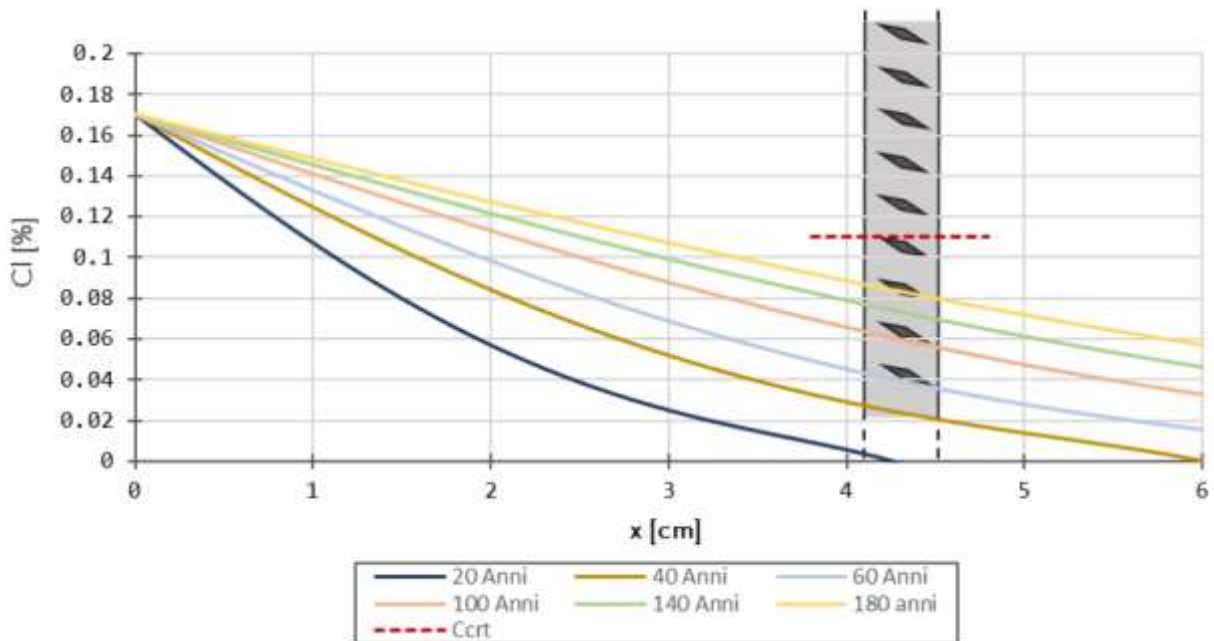
Figura 6. Provini realizzati con calcestruzzo additivato con Penetron Admix ® – prove di diffusione naturale dei cloruri – metodo del nitrato di argento



Sulla base dei risultati ottenuti, e con riferimento a solo titolo esemplificativo ad uno scenario di esercizio che vede un contenuto iniziale di cloruri sulla superficie dei manufatti pari allo 0.17% in peso del calcestruzzo stesso, si sono stimati i profili di concentrazione dei cloruri in funzione del tempo, al fine di determinare il tempo di raggiungimento di un valore di concentrazione critica, assunto pari allo 0.11% in peso del calcestruzzo, al livello delle armature. I risultati sono mostrati in Figura 6.



(a)



(b)

Figura 6. Evoluzione nel tempo dei profili di concentrazione dei cloruri per calcestruzzo ordinario(a) e calcestruzzo additivato con Penetron Admix (b)



POLITECNICO
MILANO 1863

3. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Alla luce dei risultati ottenuti si può concludere come l'aggiunta dell'additivo cristallizzanti comporti una superiore durabilità del calcestruzzo in stadio non fessurato, con valori sia del rateo di carbonatazione sia del coefficiente di diffusione apparente dei cloruri inferiori di oltre il 50% rispetto a quelli misurati per un analogo calcestruzzo non contenente l'additivo cristallizzante.

Attraverso opportuni modelli di propagazione dei fenomeni disponibili in letteratura si è potuto anche di stimare l'incremento di vita utile conseguente alla aggiunta nel mix-design dell'additivo. In particolare dal grafico di Figura 2 si evince come l'utilizzo dell'additivo cristallizzante consenta di ottenere tempi di carbonatazione dello spessore di copriferro, assunto pari a 40 mm, superiori a 100 anni, quali richiesti per garantire la vita nominale prescritta dalle NTC 2018 per opere infrastrutturali di importanza strategica, categoria assunta per la struttura in oggetto.

Tale risultato va ovviamente contestualizzato di volta in volta con gli scenari di esercizio strutturale, sia con riferimento alle condizioni ambientali sia con riferimento alle reali condizioni di esercizio del materiale all'interno della struttura.

Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

Politecnico di Milano

28 febbraio 2023

Prof. Ing. Liberato Ferrara