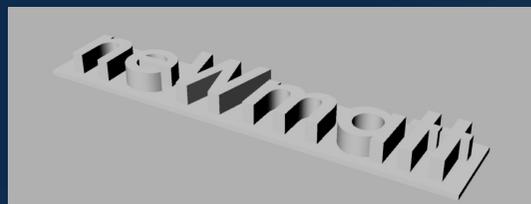


**Gruppo di ricerca neWmatt
Università degli Studi di
Salerno**



**CAPAROL Italiana
GmbH & Co. KG**



DURABILITA' E RISANAMENTO DEL CALCESTRUZZO SOGGETTO AD ATTACCHI CHIMICI

**Fernando Fraternali
Hotel Dei Principati
Baronissi, 30.10.2012**

Il presente lavoro descrive le attività svolte nell'ambito di una Convenzione di ricerca tra la società Caparol Italiana GmbH & Co. KG di Vermezzo (MI) ed il Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università degli Studi di Salerno (DICIV).

Tale Convenzione ha avuto come oggetto uno studio sulle prestazioni chimiche e meccaniche di prodotti a base polimerica e malte per il ripristino strutturale utilizzati per trattamenti di protezione e risanamento di elementi in calcestruzzo, soggetti ad attacchi chimici da carbonatazione, cloruri e solfati ed attacchi fisici dovuti a cicli di gelo/disgelo.

Finalità principali della presente indagine:

- Analizzare l'efficacia protettiva di alcuni prodotti della linea Hi-Tech della Caparol su costruzioni in calcestruzzo soggette ad attacchi chimici
- Stimare la vita utile dei calcestruzzi trattati con tali prodotti
- Valutare la resistenza meccanica del calcestruzzo degradato, a seguito di risanamento con malte fibro-rinforzate

Principali prodotti testati



Disbocret 515 Betonfarbe

Protettivo specifico per c.a., pigmentato opaco seta, a base di copolimeri acrilici in dispersione acquosa. Protezione specifica del cemento armato di gettata o prefabbricato, per nuovi edifici, o dopo gli interventi di riparazione e cosmesi superficiale, di cementi armati invecchiati.



Disbocret 519 pccFlex - Schlamme

Rivestimento cementizio bicomponente ad elevata elasticità con molteplici possibilità d'impiego. Ideale per la copertura di crepe generalizzate e contro la penetrazione di acqua e sostanze pericolose per il calcestruzzo di posa fresca o vecchia.

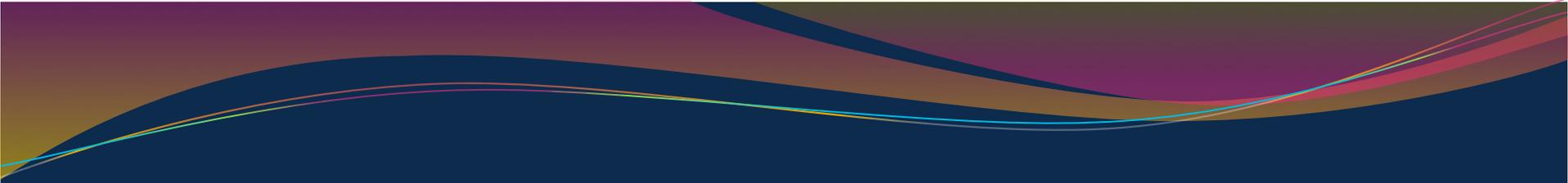


Disbocret 504 Protec plus

Malta cementizia fibrorinforzata di ripristino per spessori fino a mm 20 per strato. Granulometria di circa 2,5 mm. Per effettuare opere di ricostruzione di profili in aree urbane soggette ad alta concentrazione di agenti aggressivi che causano il deterioramento dei calcestruzzi e delle armature. Diluizione: 17-18% con acqua (4,25 -4,5 litri di acqua per sacco da 25 kg) Resa: 18 kg/m² per 1,0 cm di spessore.

Schema della presentazione

- Introduzione alla problematica della durabilità delle costruzioni in calcestruzzo
- Il calcestruzzo: definizioni base e normativa
- Programma delle prove sperimentali a base del progetto di ricerca DICIV- CAPAROL
- Analisi del degrado per effetto di attacchi da cloruri
- Analisi del degrado per effetto di attacchi da solfati
- Proprietà meccaniche del calcestruzzo soggetto ad attacchi chimici
- Ripristino del calcestruzzo deteriorato con malte fibro-rinforzate
- Conclusioni e lavoro futuro



Introduzione alla problematica della durabilità delle costruzioni in calcestruzzo

Definizioni:

DURABILITA'



E' definita come conservazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali e delle strutture, proprietà essenziale affinché i livelli di sicurezza vengano mantenuti durante tutta la vita dell'opera. (D.M. 14/01/2008)



VITA NOMINALE

Rappresenta il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve poter essere usata per lo scopo al quale è destinata (D.M. 14/01/2008).



DEGRADO

E' per definizione la graduale diminuzione delle prestazioni nel tempo.

Cause di degrado:



Vita nominale delle costruzioni ai sensi del DM 14/01/2008

Come si è già osservato, la vita nominale (V_N) di una struttura è definita dal DM del 14/01/2008 come: “il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve poter essere usata per lo scopo al quale è destinata”

Il DM 14/01/2008 distingue differenti tipi di vita nominale per ogni diverso tipo di costruzione, a seconda del carattere strategico dell'opera e della rilevanza delle conseguenze di un eventuale collasso:

TIPI DI COSTRUZIONE		Vita Nominale V_N (in anni)
1	Opere provvisorie – Opere provvisionali - Strutture in fase costruttiva ¹	≤ 10
2	Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale	≥ 50
3	Grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica	≥ 100

Durabilità e copriferro (EUROCODICE 2 – EC2)

$$c_{\text{nom}} = c_{\text{min}} + \Delta c_{\text{dev}}$$

$$c_{\text{min}} = \max \{c_{\text{min},b}; c_{\text{min},dur} + \Delta c_{\text{dur},\gamma} - \Delta c_{\text{dur},st} - \Delta c_{\text{dur},add}; 10 \text{ mm}\}$$

Δc_{dev} = margine di sicurezza aggiuntivo

dove:

$c_{\text{min},b}$ rappresenta il copriferro minimo dovuto al requisito di aderenza

$c_{\text{min},dur}$ rappresenta il copriferro minimo dovuto alle condizioni ambientali

$\Delta c_{\text{dur},\gamma}$ è il margine di sicurezza

$\Delta c_{\text{dur},st}$ è la riduzione del copriferro minimo quando si utilizza acciaio inossidabile

$\Delta c_{\text{dur},add}$ è la riduzione del copriferro minimo quando si ricorre a protezione aggiuntiva

N.B.

$$c_{\min} = \max \{c_{\min,b}; c_{\min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10 \text{ mm}\}$$

Per calcestruzzo con protezioni aggiuntive (per esempio rivestimento) il copriferro minimo può essere ridotto di $\Delta c_{dur,ad}$.

Il valore di $\Delta c_{dur,add}$ da adottare in uno Stato può essere reperito nella sua appendice naturale. Il valore raccomandato, in assenza di prescrizioni aggiuntive, è 0 mm.

Circolare sulle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" di cui al DM 14 gennaio 2008

Tabella C4.1.IV Copriferri minimi in mm

C_{\min}	C_o	ambiente	barre da c.a. elementi a piastra		barre da c.a. altri elementi		cavi da c.a.p. elementi a piastra		cavi da c.a.p. altri elementi	
			$C \geq C_o$	$C_{\min} \leq C < C_o$	$C \geq C_o$	$C_{\min} \leq C < C_o$	$C \geq C_o$	$C_{\min} \leq C < C_o$	$C \geq C_o$	$C_{\min} \leq C < C_o$
C25/30	C35/45	ordinario	15	20	20	25	25	30	30	35
C28/35	C40/50	aggressivo	25	30	30	35	35	40	40	45
C35/45	C45/55	molto ag.	35	40	40	45	45	50	50	50

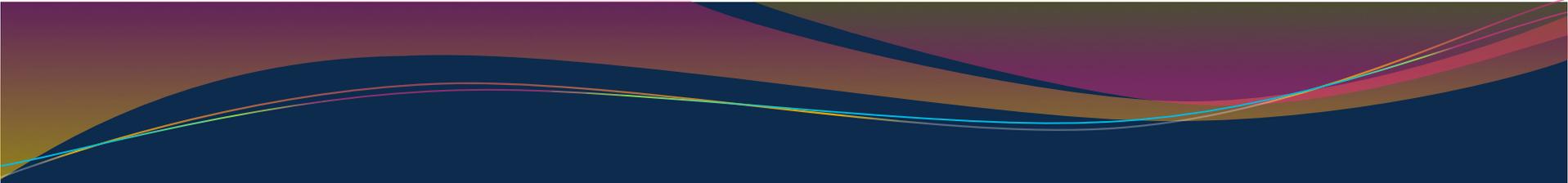
Protezione delle strutture da attacchi chimici

Le prestazioni di un componente edilizio in conglomerato cementizio si possono dedurre dalla conoscenza della sua vita nominale, della classe d'uso alla quale si fa riferimento e della affidabilità del componente stesso.

Un elemento strutturale subisce al variare del tempo una naturale caduta prestazionale, in relazione alla vita utile propria dei materiali impiegati per realizzarlo ed alla loro messa in opera. Oltre un certo limite di soglia, la prestazione del componente raggiunge valori sotto i quali esso non è più in grado di assicurare una risposta efficace, in relazione alla funzione richiestagli, il che indica che si è raggiunto il termine della sua vita utile.

Affinché questo limite venga raggiunto in un tempo sufficientemente superiore alla vita nominale prevista dal progettista, occorre proteggere in modo adeguato il calcestruzzo impiegato per ogni diverso componente dell'opera in esame.

Risulta pertanto di notevole importanza la valutazione dell'efficacia di specifici trattamenti nei confronti di fenomeni di degrado ricorrenti, quali l'attacco da carbonatazione, l'attacco da cloruri e l'attacco da solfati.



Il calcestruzzo: definizioni base e normativa

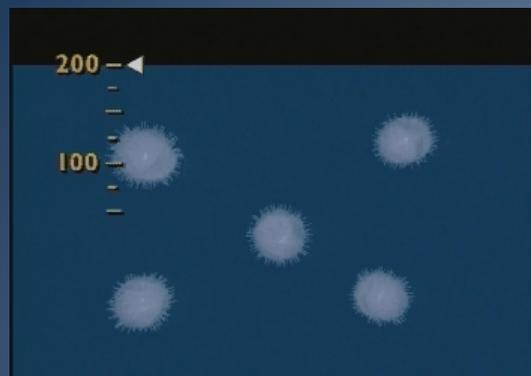
Alcune nozioni base

Come e' ben noto, il calcestruzzo è un conglomerato di elementi lapidei sciolti tenuti assieme dalla pasta cementizia (miscela di acqua e cemento), che funge da collante.

La mescola dei granuli del cemento con l'acqua determina una reazione di idratazione, i cui prodotti sono i seguenti:

- gli idrosilicati di calcio di natura prevalentemente fibrosa
- gli alluminati di calcio idrati
- l'idrossido di calcio

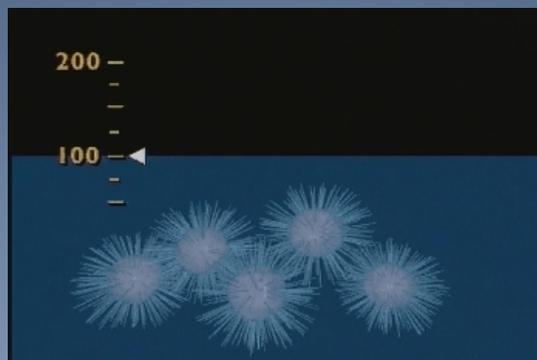
In particolare, gli idrosilicati di calcio si sviluppano in forma di fibre che si intrecciano tra loro determinando le caratteristiche meccaniche e la durabilità del calcestruzzo. Un eventuale quantità in eccesso di acqua si posiziona tra i singoli granuli di cemento provocando un aumento della loro reciproca distanza ed un più allentato intreccio tra le fibre di idrosilicati. Il risultato è una pasta di cemento con scarsa resistenza meccanica, porosa e perciò permeabile all'acqua e agli agenti chimici aggressivi contenuti nell'acqua.



Riferimento: M. Collepardi, S. Collepardi, J.J. Ogoumah Olagot, F. Simonelli, R. Troli, 2010. *Diagnosi del Degrado e Restauro delle Strutture in C.A.*, Seconda Edizione, Enco S.r.l., Ponzano Veneto (TV)

Se si diminuisce la quantità di acqua d'impasto i granuli di cemento si avvicinano invece tra di loro, facilitando la formazione di un intreccio di fibre più denso e compatto. Abbassando il rapporto acqua cemento, quindi, si facilita la formazione di una microstruttura della pasta cementizia meno porosa.

Diminuire il più possibile l'acqua di impasto è la regola fondamentale e tanto è più aggressivo l'ambiente in cui l'opera sarà costruita, tanto più basso dovrà essere il rapporto a/c adottato. Quando questa regola non viene adottata la struttura è inevitabilmente destinata a degradarsi nel tempo.

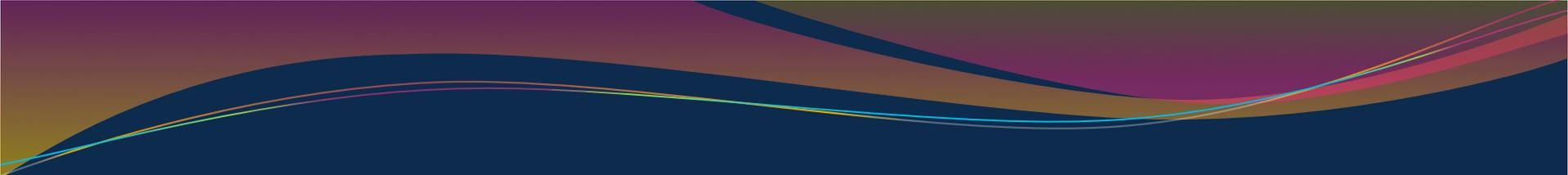


Riferimento: M. Collepari, S. Collepari, J.J. Ogoumah Olagot, F. Simonelli, R. Troli, 2010. *Diagnosi del Degrado e Restauro delle Strutture in C.A.*, Seconda Edizione, Enco S.r.l., Ponzano Veneto (TV)

CLASSI DI ESPOSIZIONE SECONDO NORMATIVA UNI EN 206 - 2006

prospetto F1 Valori limite raccomandati per la composizione e le proprietà del calcestruzzo

	Classi di esposizione																	
	Nessun rischio di corrosione o attacco	Corrosione da carbonatazione				Corrosione da cloruri						Attacco gelo/degelo				Ambienti chimici aggressivi		
						Acqua marina			Altri cloruri (diversi dall'acqua di mare)									
		X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2
Rapporto massimo a/c	-	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,45	0,55	0,55	0,45	0,55	0,55	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45
Classe di resistenza minima	C12/15	C20/25	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C35/45	C30/37	C30/37	C35/45	C30/37	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45
Contenuto minimo di cemento (kg/m ³)	-	260	280	280	300	300	320	340	300	300	320	300	300	320	340	300	320	360
Contenuto minimo di aria (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,0 ^{a)}	4,0 ^{a)}	4,0 ^{a)}	-	-	-
Altri requisiti												Aggregati in accordo alla EN 12620 con sufficiente resistenza al gelo/degelo				Cemento resistente ai solfati ^{b)}		
a)	Quando il calcestruzzo non contiene aria aggiunta, le sue prestazioni dovrebbero essere verificate conformemente ad un metodo di prova appropriato rispetto ad un calcestruzzo per il quale è provata la resistenza al gelo/degelo per la relativa classe di esposizione.																	
b)	Qualora la presenza di SO ₂ composti le classi di esposizione XA2 e XA3, è essenziale utilizzare un cemento resistente ai solfati. Se il cemento è classificato a moderata o ad alta resistenza ai solfati, il cemento dovrebbe essere utilizzato in classe di esposizione XA2 (e in classe di esposizione XA1 se applicabile) e il cemento ad alta resistenza, ai solfati dovrebbe essere utilizzato in classe di esposizione XA3.																	



**Programma delle prove
sperimentali a base del
progetto di ricerca
DICIV- CAPAROL**

Preparazione dei provini di calcestruzzo analizzati

	<i>dosaggio teorico per 1 m³</i>	Impasto	Impasto per
	[Kg/m ³]	25 Lt.	0,15 m³
Sabbia	934	23,35 Kg	140,10 Kg
Aggregato medio N.1	187	4,68 Kg	28,05 Kg
Aggregato grosso N.2	747	18,68 Kg	112,05 Kg
Cemento	340	8,50 Kg	51,00 Kg
Acqua	165	4,13 Kg	24,75 Kg
SKY 524	2,4	0,06 Kg	0,36 Kg

Mix-design utilizzato per la preparazione dei provini di calcestruzzo.

Cemento: CEM IV/B 32.5R (UNI-EN 197-1). Granulometria: sabbia 0-4 mm, aggregato medio 4-10 mm; aggregato grosso 10-20 mm.



Immagini dei provini in calcestruzzo in preparazione (sinistra), protetti con la finitura acrilica AC 515 (provini chiari) e con la malta CM 519 (provini scuri) sottoposti a prova accelerata di resistenza alla carbonatazione.



Immagini delle lastre rimosse dalle superfici laterali di un provino prismatico non protetto (sinistra), un provino prismatico protetto con la finitura acrilica AC 515 (centro) ed un provino prismatico protetto con la malta CM 519 (destra).

Programma delle prove sperimentali

- Prove meccaniche

 - Prove di resistenza a compressione

 - Prove di resistenza a trazione

 - Prove di resistenza a flessione

- Prove chimiche

 - Test per la diagnosi dell'attacco da carbonatazione

 - Test per la diagnosi dell'attacco da cloruri

 - Test per la diagnosi dell'attacco da solfati

 - Prove di resistenza a cicli termici gelo-disgelo



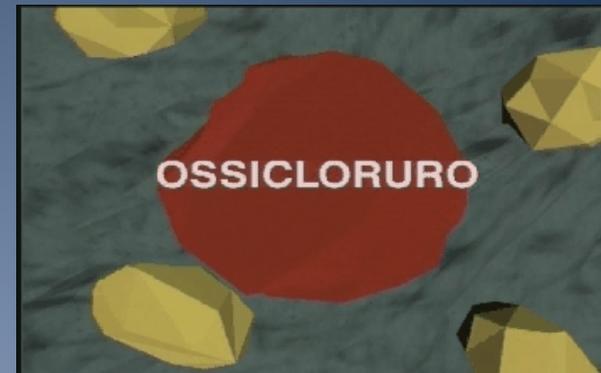
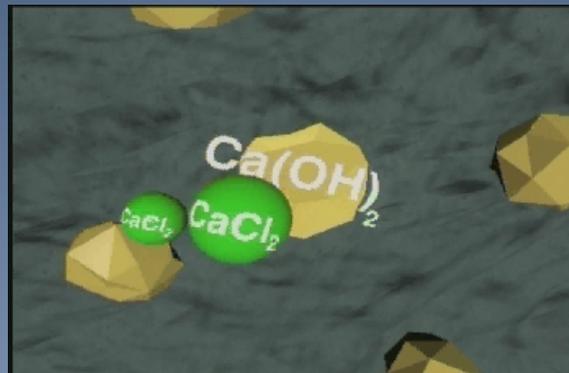
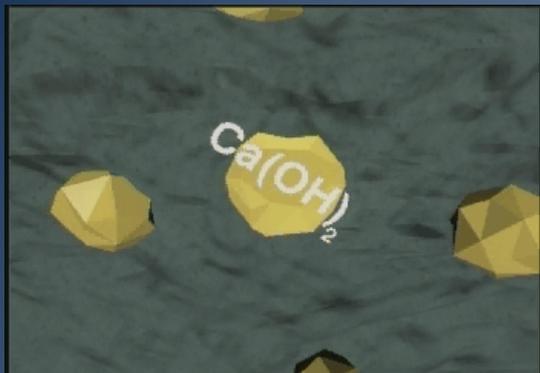
**Analisi del degrado del
calcestruzzo per effetto di
attacchi da cloruri**

Degrado del calcestruzzo per effetto di attacchi da cloruri

Il cloruro, sottoforma di cloruro di calcio o cloruro di sodio è impiegato frequentemente per sciogliere il ghiaccio sulle infrastrutture viarie.

Il cloruro di calcio aggredisce la pasta di cemento, reagisce infatti con la calce presente nella matrice cementizia formando ossicloruro di calcio idrato.

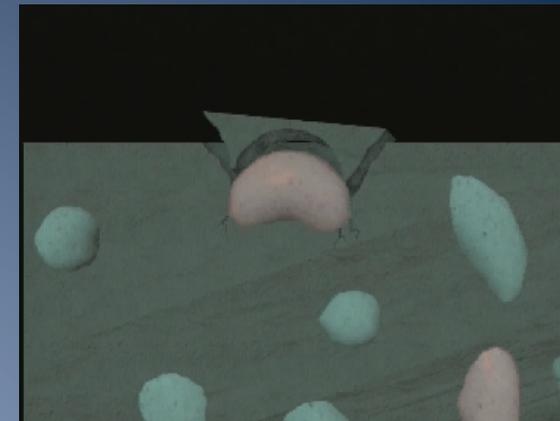
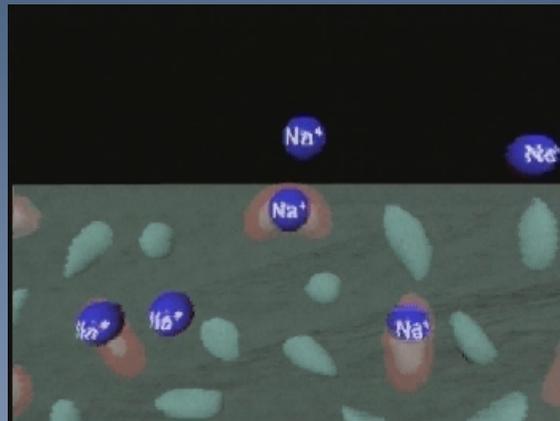
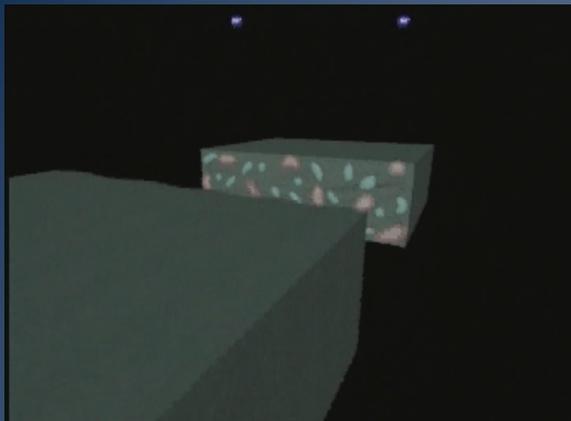
Questa reazione è di natura espansiva, provoca quindi fenomeni di rigonfiamento, fessurazione e distacchi del materiale. L'azione distruttiva del cloruro di calcio si accentua alle basse temperature.



Il cloruro di sodio è un temibile agente aggressivo solo per i calcestruzzi con aggregati alcali-reattivi cioè capaci di reagire con il sodio ed il potassio.

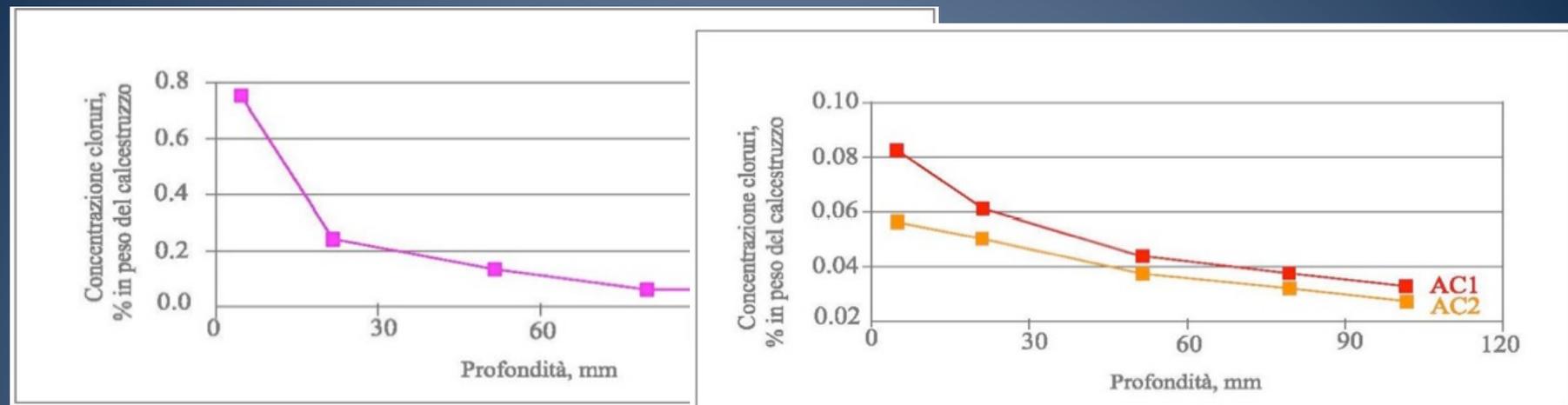
Il sodio già presente nel cemento o penetrato dall'esterno può reagire in particolare con alcuni aggregati silicei generando fenomeni di espansione e di fessurazione soprattutto in strutture non protette ed esposte all'umidità.

Questo tipo di ammaloramento coinvolge, oltre alle opere stradali, anche i manufatti in calcestruzzo a diretto contatto con l'acqua di mare che contiene, tra l'altro, cloruro di sodio.



Studio di letteratura

Uno studio di Almasullam et al. (2003) ha valutato l'efficacia di rivestimenti acrilici superficiali del calcestruzzo (AC_1 e AC_2) nei confronti della penetrazione di ioni cloro provenienti dal cloruro di sodio su provini di calcestruzzo (75mm x 50mm) realizzati con cemento Portland. A circa 24÷25 mm dalla superficie del provino, si registrano concentrazioni di cloruro, pari a 0.050% e 0.060%, rispettivamente nel caso AC_1 e nel caso AC_2 . I provini non trattati presentano invece una percentuale di cloruri pari a 0.25 alla stessa profondità.



Indagine sperimentale in laboratorio

Due provini cubici trattati con rivestimento AC 515 ed un provino uncoated sono stati sottoposti a test colorimetrici per determinare la percentuale di ioni cloro Cl^- presenti nel calcestruzzo a seguito di attacchi chimici da cloruri di tipo accelerato

I provini sono stati immersi in una soluzione di cloruro di sodio per 16 ore e successivamente sono stati asciugati in forno

La soluzione di attacco impiegata è stata ottenuta sciogliendo 300g di cloruro di sodio NaCl in 1L di acqua

Il ciclo è stato ripetuto per tre volte

Al termine dei cicli di attacco è stata misurata la percentuale in peso di ioni cloro (Cl^-) presenti nei diversi provini con tecnica colorimetrica mediante fenolftaleina

Risultati dei test di laboratorio sulla penetrazione di ioni Cl⁻ nel calcestruzzo

Campione	% di ione Cl ⁻ riferito al peso del calcestruzzo
C1-Provino AC 515 n.1	0.050
C2-Provino AC 515 n.2	0.050
Crif-Provino non trattato	0.214

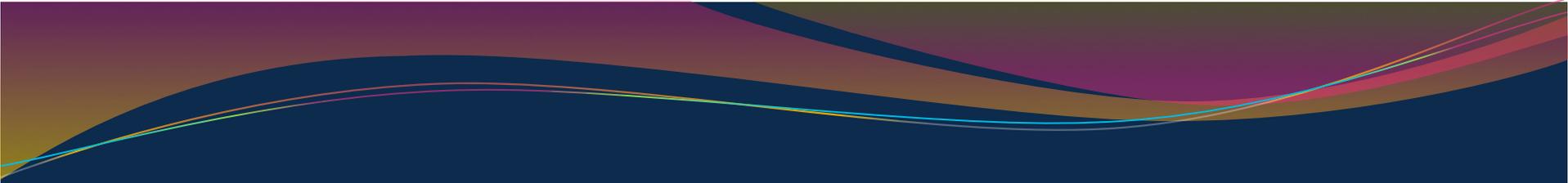
Considerazioni in merito all'indagine sperimentale in laboratorio

Un confronto tra i risultati della presente indagine e lo studio di letteratura di Almasullam et al. (2003) porta a concludere che la protezione esplicita dal rivestimento AC 515 è assimilabile a quella corrispondente al rivestimento AC₁ analizzato in Almasullam et al. (2003).

Si nota, inoltre, che la percentuale di ioni cloro nei provini di calcestruzzo non protetto, alla profondità di 25 mm è pari a 4-5 volte quella misurata nei provini AC₁ e AC515.

Provini	Concentrazioni ioni Cl⁻ in % rispetto al peso del calcestruzzo
AC 515	~ 0.050 %
AC ₁	~ 0.050 %
AC ₂	~ 0.060 %
Non trattati Almasullam et al. (2003)	~ 0.250 %
Non trattati presente studio	~ 0.214 %

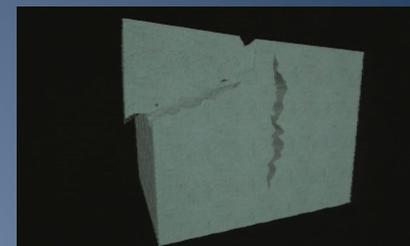
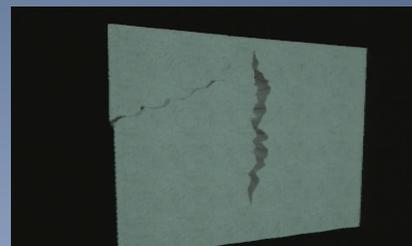
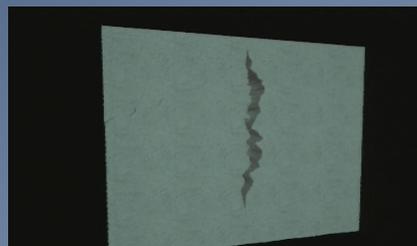
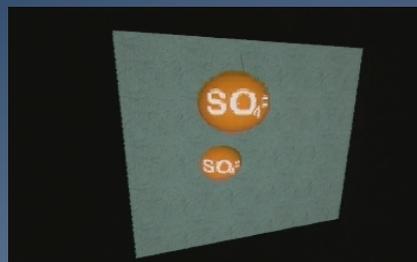
Percentuali di ioni Cl⁻ in % in peso rispetto al calcestruzzo registrate alla profondità di 25 mm



Analisi del degrado del calcestruzzo per effetto di attacchi da solfati

Degrado del calcestruzzo per effetto di attacchi da solfati

Nel mare si rinvengono, oltre al cloruro di sodio, altri agenti aggressivi del calcestruzzo, quali i solfati, che sono anche presente in alcuni terreni o acque naturali. Il solfato reagisce chimicamente con la calce presente nel conglomerato e la trasforma nel più voluminoso gesso idrato. Questo composto reagisce a sua volta con gli alluminati di calcio idrati (indicati con la sigla C-A-H nelle figure che seguono) dando origine all'ettringite. Anche questa trasformazione provoca un aumento di volume nel materiale con un effetto dirompente sulla struttura.

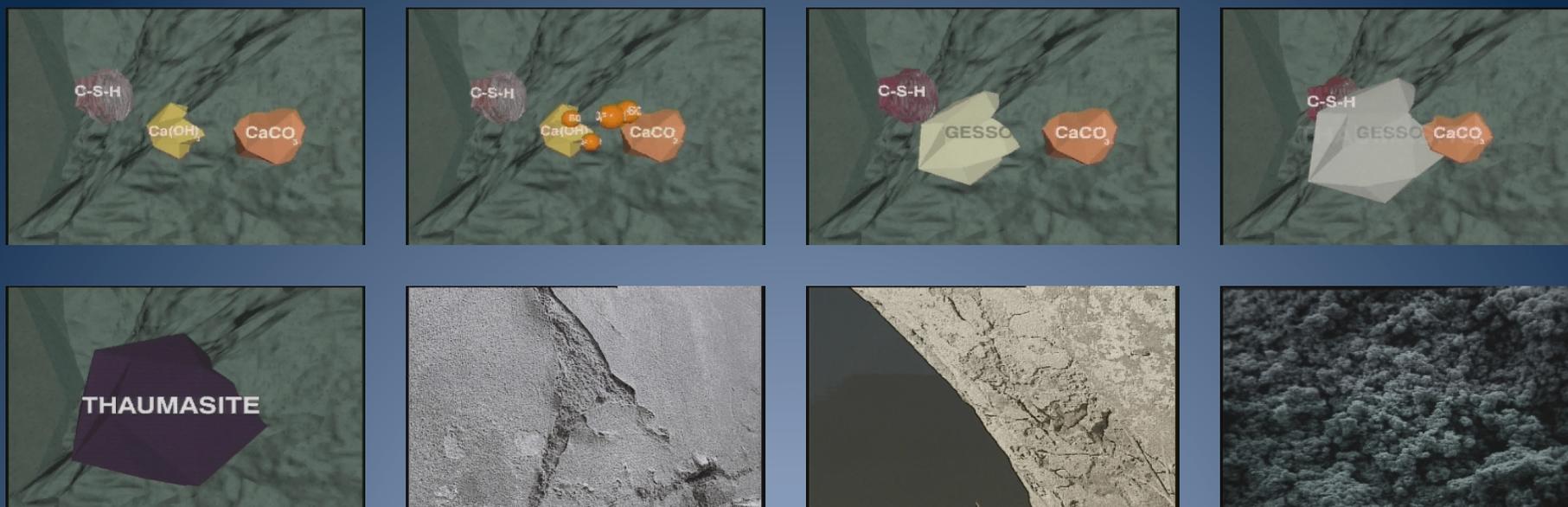


Riferimento: M. Collepari, S. Collepari, J.J. Ogoumah Olagot, F. Simonelli, R. Troli, 2010. *Diagnosi del Degrado e Restauro delle Strutture in C.A.*, Seconda Edizione, Enco S.r.l., Ponzano Veneto (TV)

In particolari condizioni ambientali l'effetto del solfato sul calcestruzzo può risultare ancora più distruttivo.

Ad una temperatura tra lo 0 ed i 5°C con umidità relativa superiore al 95% ed in presenza di anidride carbonica, il solfato si combina con la calce e la trasforma in gesso. Il gesso, a sua volta, reagisce con i silicati di calcio idrati (indicati con la sigla C-S-H nelle immagini che seguono) e con il carbonato di calcio CaCO_3 per dar luogo alla thaumasite.

La thaumasite causa una vera e propria disgregazione del calcestruzzo che si trasforma in un materiale del tutto incoerente. L'esame al microscopio elettronico evidenzia che la pasta cementizia è completamente disgregata.



Riferimento: M. Collepardi, S. Collepardi, J.J. Ogoumah Olagot, F. Simonelli, R. Troli, 2010. *Diagnosi del Degrado e Restauro delle Strutture in C.A.*, Seconda Edizione, Enco S.r.l., Ponzano Veneto (TV)

Indagine sperimentale in laboratorio

Tre provini cubici trattati con rivestimento AC 515 ed un provino uncoated sono stati sottoposti a test turbidimetrici per determinare la percentuale di ioni solfato SO_4^{--} presenti nel calcestruzzo a seguito di attacchi chimici da solfati di tipo accelerato

I provini sono stati immersi in una soluzione di in una soluzione di solfato di magnesio per 16 ore e successivamente sono stati asciugati in forno. La soluzione di attacco impiegata è stata ottenuta sciogliendo 215 g di solfato di magnesio in un litro di acqua

Il ciclo è stato ripetuto per tre volte

Al termine dei cicli di attacco è stata misurata la percentuale in peso di ioni solfato (SO_4^{--}) presenti nei diversi provini con test turbidimetrico

Dettaglio del test turbidimetrico

- La prova ha inizio con l'estrazione di porzioni di aggregato con acqua, per rimuovere gli ioni solfati
- Il contenuto viene determinato per precipitazione con una soluzione di cloruro di bario (BaCl_2)
- La soluzione viene filtrata attraverso un filtro di carta di grado medio
- La determinazione vera e propria del contenuto di solfati, viene effettuata per turbidimetria, sul liquido filtrato, con spettrofotometro UV-Vis ad una lunghezza d'onda di 420 nm

Risultati dei test di laboratorio sulla penetrazione di ioni SO_4^{--} nel calcestruzzo

Campione	% di SO_4^{--} in volume riferita al volume totale del provino	% di SO_4^{--} in massa riferita alla massa di cemento del provino
Provino trattato 1	0,8	0,23
Provino trattato 2	0,8	0,23
Provino trattato 3	0,9	0,26
Provino uncoated	3,2	0,94

Previsione della vita utile sotto attacchi solfatici

L'evoluzione del danneggiamento del calcestruzzo nel tempo può essere come segue (Jambor, 1980):

$$DC = RC \times 0,143 \times t^{0,33}$$

Differenziando la formulazione analitica del degrado DC per provini trattati e non e ponendo il prodotto $RC \times 0,143$ pari a K, avremo:

$$DC_{\text{trattati}} = K_{\text{trattati}} \times t^{0,33}$$

$$DC_{\text{nontrattati}} = K_{\text{non trattati}} \times t^{0,33}$$

Da cui, si possono dedurre i valori di K

$$-DC_{\text{trattati}}$$

$$-DC_{\text{non trattati}}$$

-t = 48 h nell'ipotesi di degrado chimico accelerato in laboratorio

Campione	% di SO ₃ in volume riferita al volume totale del provino
Provino trattato 1	0,8
Provino trattato 2	0,8
Provino trattato 3	0,9
Provino non trattato	3,2

Assumendo che un provino trattato raggiunga lo stesso grado di corrosione (DC) di un provino non trattato dopo un opportuno tempo di dilazione Δt , si può scrivere:

$$K \text{ trattati} \times (t + \Delta t)^{0,33} = K \text{ non trattati} \times t^{0,33}$$

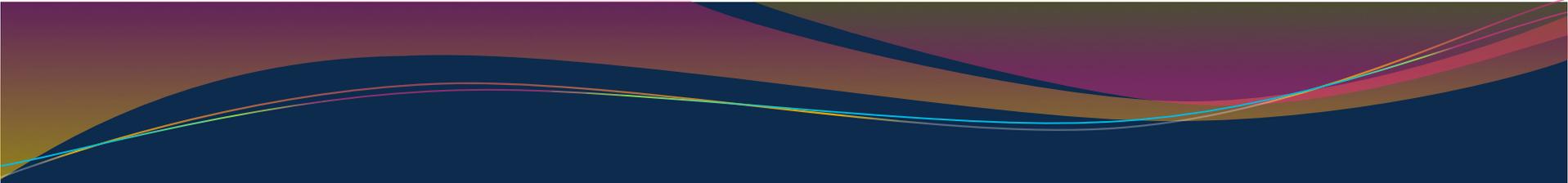
Comparando le 48 h di degrado chimico accelerato in laboratorio ad 1 anno di degrado naturale

Si ottiene un $\Delta t = 57,97$ anni

Considerazioni in merito all'indagine sperimentale in laboratorio

Una struttura in calcestruzzo trattato con la finitura acrilica AC 515 presenta una vita efficace di circa 60 volte più lunga di quella di una struttura in calcestruzzo non trattato, almeno per quanto concerne la resistenza agli attacchi solfatici. Questo risultato va ovviamente interpretato in senso qualitativo, attese le diverse semplificazioni introdotte nei calcoli.

Esso tuttavia mette in evidenza come la protezione del calcestruzzo possa giocare un ruolo di fondamentale importanza nei confronti della durabilità del materiale.



Proprietà meccaniche del calcestruzzo soggetto ad attacchi chimici

Sono stati eseguiti test sulla resistenza meccanica a compressione di provini cubici di lato 7 cm soggetti ad attacchi di gelo e disgelo, attacchi da cloruri ed attacchi da solfati.

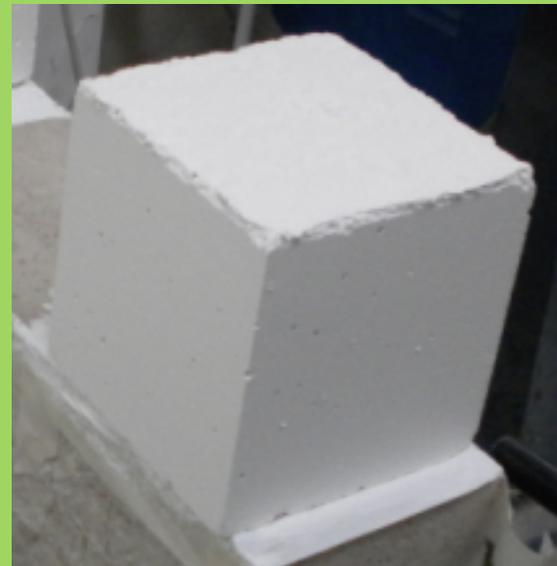
Il valore di riferimento della resistenza a compressione del calcestruzzo impiegato per la preparazione di tali provini, in assenza di attacchi e trattamenti, è pari a 31-32 MPa.

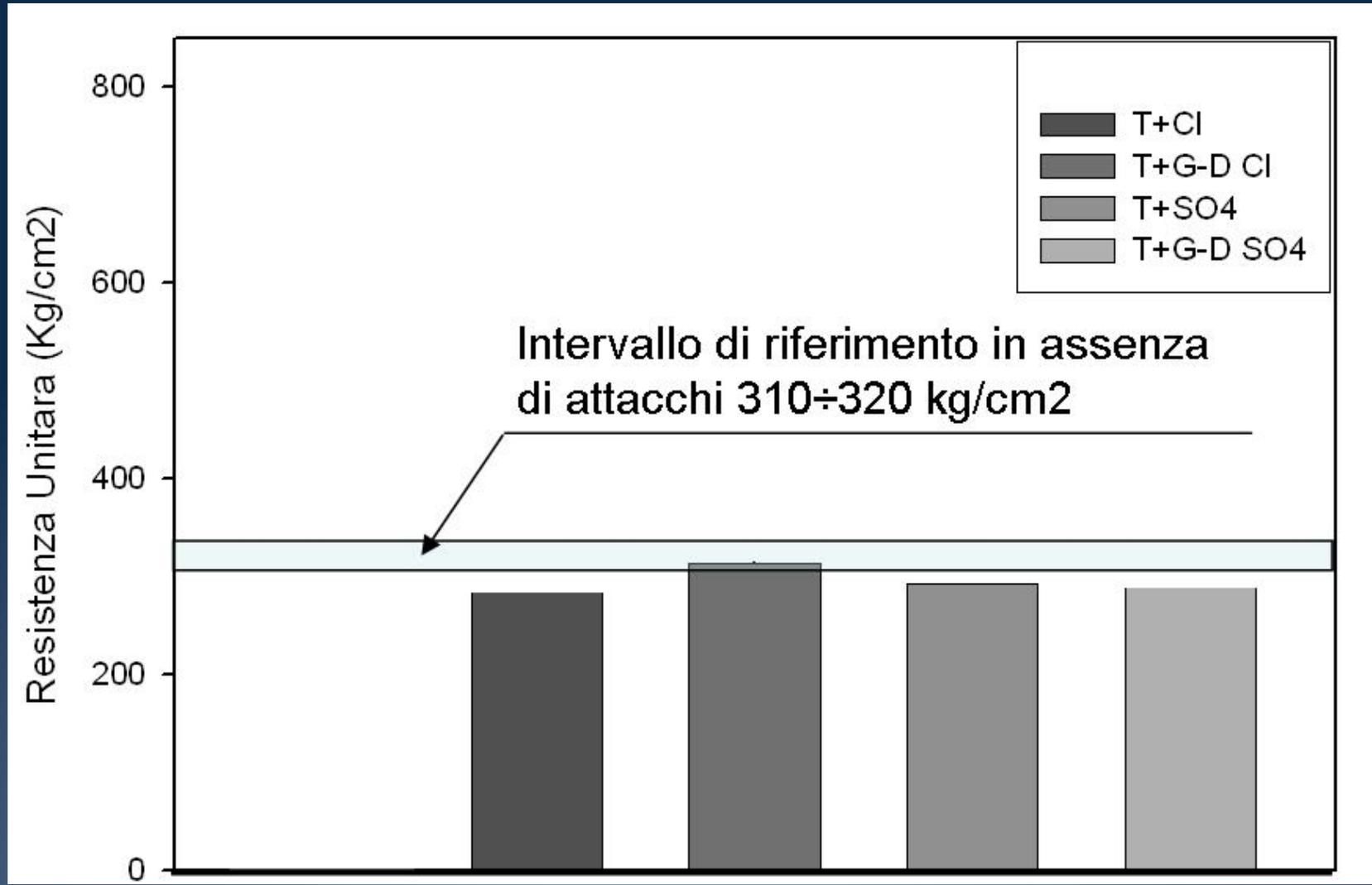
Il grafico che segue mostra una sintesi dei risultati ottenuti in termini di resistenza a compressione dei provini analizzati, distinguendo provini T+Cl (provini soggetti ad attacco con cloruri semplice); provini T+SO₄ (provini soggetti ad attacco con solfati semplice); provini T+G-D Cl (provini soggetti a cicli di gelo-disgelo seguiti da attacco con cloruri) e provini T+G-D SO₄ (provini soggetti a cicli di gelo-disgelo seguiti da attacco con solfati).

**PROVINI
NON
TRATTATI**



**PROVINI
TRATTATI**



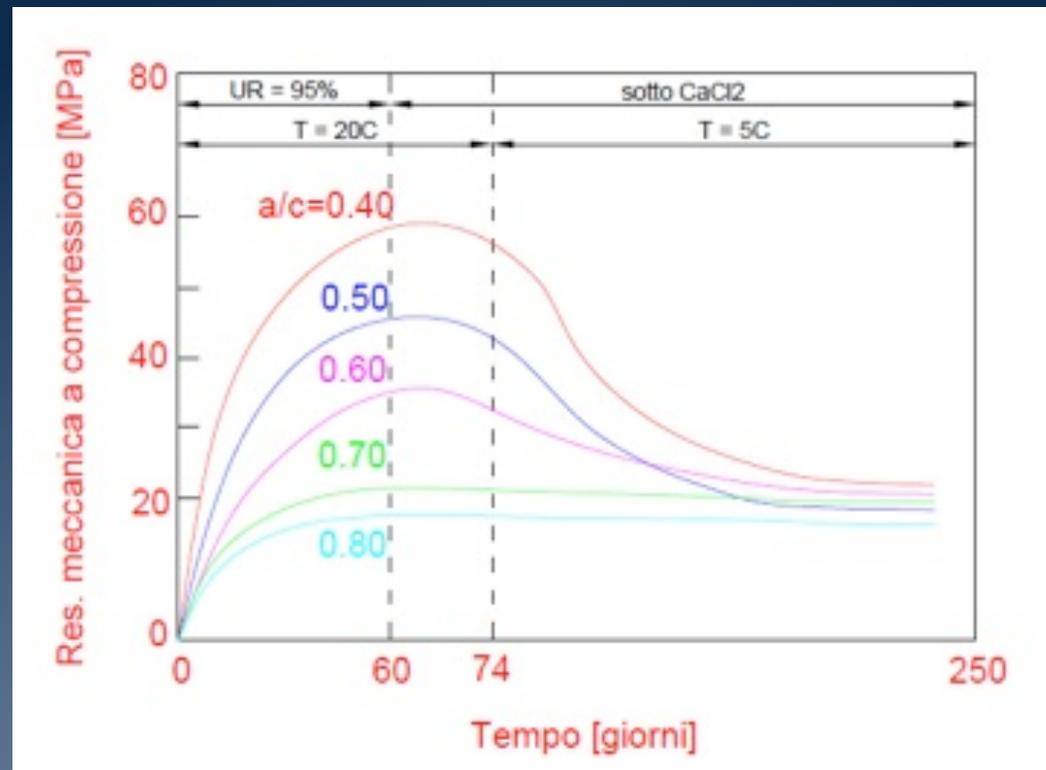


Considerazioni in merito ai test di resistenza a compressione

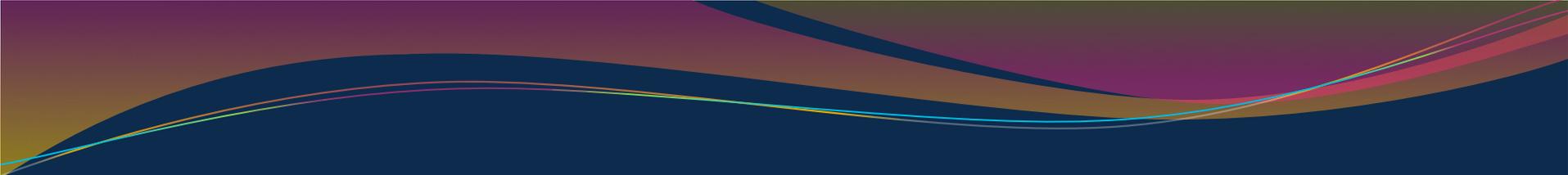
Un'analisi dei risultati ottenuti evidenzia che gli attacchi con Cl, SO₄, G-D SO₄ e G-D Cl presentano aggressività più o meno accentuate. I valori medi delle resistenze alla compressione registrate nei vari casi esaminati sono rispettivamente: 28.4 MPa ; 29.3 MPa ; 29 MPa e 31.4 MPa.

Il trattamento con la finitura acrilica 515 ha determinato una protezione più che soddisfacente dei campioni testati. I risultati ottenuti mettono in evidenza, infatti, che tutti i provini sottoposti ad attacchi hanno esibito valori di resistenza alla compressione non di molto inferiori al valore di riferimento di 31÷32 MPa (~310÷320 kg/cmq), con fattori di riduzione variabili tra lo 0÷0.3% (attacco G-D Cl) e l'8÷10% (attacco Cl)

E' utile sottolineare che la perdita di resistenza a compressione del calcestruzzo per effetto di attacchi chimici può raggiungere valori molto più elevati di quelli osservati nel corso della presente indagine, come si è può osservare nel grafico che segue.



Resistenza meccanica a compressione dei provini conservati in soluzioni al 30% di CaCl_2 a 5°C e 20°C al variare del rapporto acqua/cemento (Collepari et al., 2006)



Ripristino del calcestruzzo deteriorato con malte fibro- rinforzate

Come effettuare il ripristino del calcestruzzo deteriorato?

In anni recenti si sono andate sempre più diffondendo in campo tecnico malte cementizie rinforzate con fibre (FRCM), che sono risultate particolarmente adatte ad interventi di ripristino di superfici di calcestruzzo deteriorato di una certa importanza.

I vantaggi delle malte fibro-rinforzate, rispetto alle malte ordinarie, sono legati principalmente ai seguenti fattori:

- ✓ Miglior rapporto a/c
- ✓ Maggiore facilità di applicazione
- ✓ Migliore essiccazione della malta
- ✓ Maggiore protezione contro agenti atmosferici
- ✓ Maggiore resistenza alla fessurazione
- ✓ Maggiore duttilità

Ripristini a flessione con malta FRCM 504

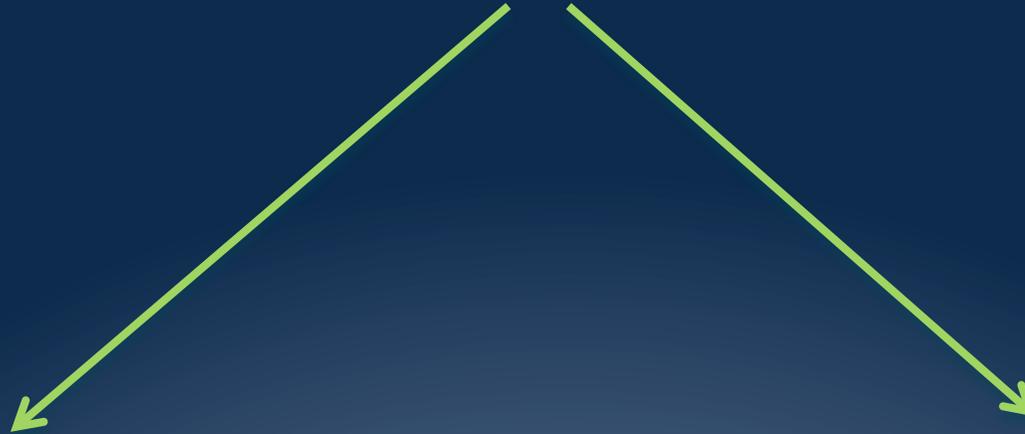
Sono stati esaminati provini di calcestruzzo prismatici $15\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ provenienti da test di laboratorio sulla resistenza alla carbonatazione.

Dalle superfici laterali di tali provini sono state rimosse lastre dello spessore di 2-3 cm, che sono state ripristinate con la malta Disbocret 504 Protec plus. Tale malta è rinforzata con fibre di polipropilene di dimensioni micrometriche (malta FRCM504).

Alcuni provini sono stati ripristinati aggiungendo alla malta Disbocret 504, in fase di stesura, ulteriori fibre plastiche in PET da riciclo (provini RPETFRCM 504).

I provini ripristinati con malta ed ulteriori provini non rinforzati (UNRC) sono stati sottoposti a test di resistenza a flessione su quattro punti, ai sensi delle norme UNI EN 11039-1,2 .

Ripristino di provini di calcestruzzo deteriorati:



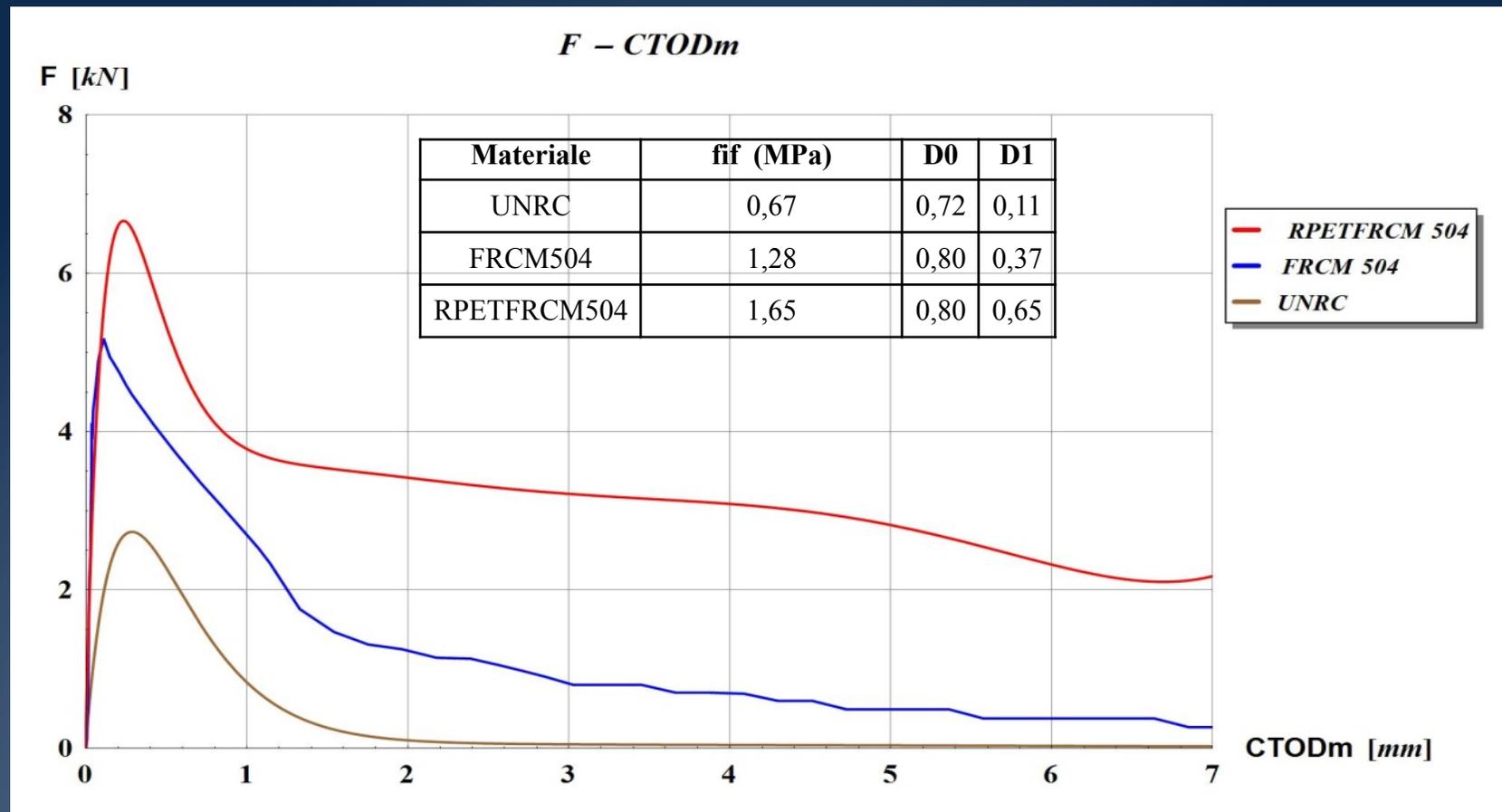
FRCM504



RPETFRCM504

Risultati dei test a flessione

I risultati delle prove a flessione sono illustrati nel grafico e nella tabella che seguono (curve carico (F) – apertura della fessura (CTODm); resistenza di prima fessurazione f_{if} ; indici di duttilità D0 e D1; UNI 11039-1,2: 2003).



Considerazioni in merito ai test di resistenza a flessione

- I risultati ottenuti mettono in luce che i provini RPETFRCM504 e FRCM504 mostrano, nell'ordine, incrementi di f_{If} del 146% e del 91% rispetto all'UNRC.
- Per quanto riguarda gli indici di duttilità, si deduce che entrambi i materiali suddetti esibiscono un incremento della duttilità di prima fessurazione (D_0) pari all'11% rispetto all'UNRC. Inoltre, i provini FRCM504 esibiscono un incremento di duttilità ultima pari al 236% rispetto all'UNRC, mentre i provini RPETFRCM504 esibiscono un incremento della stessa duttilità pari a ben il 491% rispetto all'UNRC.
- I notevolissimi incrementi della duttilità ultima osservati nei provini rinforzati con malta discendono dal fatto che il calcestruzzo non rinforzato possiede una duttilità ultima molto bassa (quasi nulla).

Rinforzi in R-PET della malta Disbocret Unitech R4



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Composites: Part B

journal homepage: www.elsevier.com/locate/compositesb



On the use of R-PET strips for the reinforcement of cement mortars

Fernando Fraternali ^{a,*}, Ilenia Farina ^a, Carmen Polzone ^b, Erminio Pagliuca ^b, Luciano Feo ^a

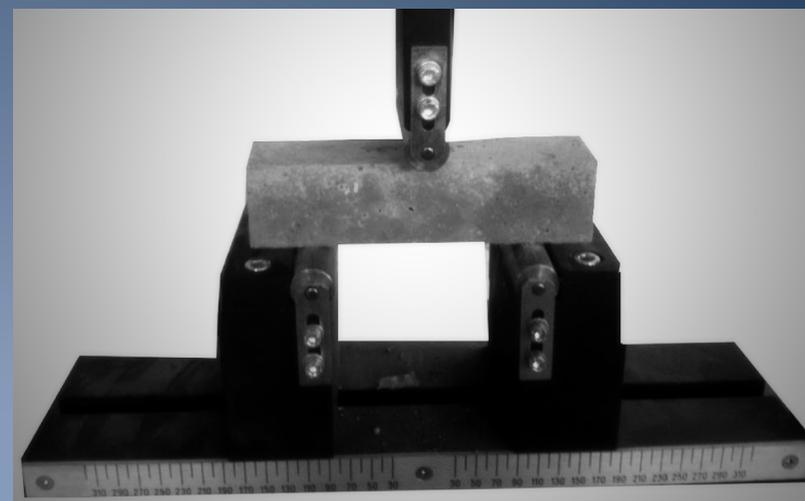
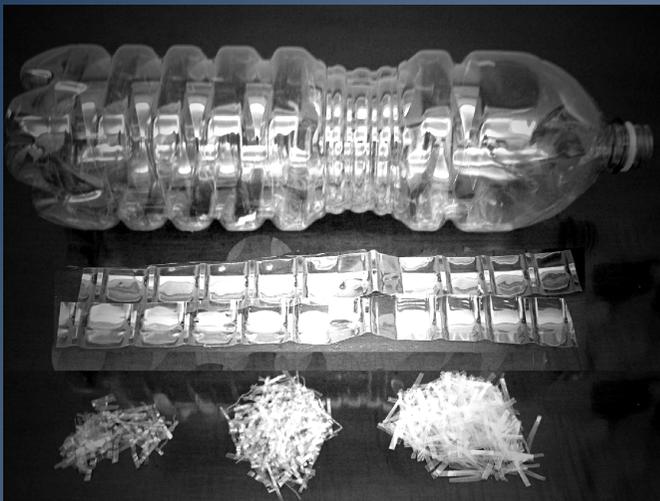
^a Department of Civil Engineering, University of Salerno, 84084 Fisciano (SA), Italy
^b Geoconsult s.r.l., S.S. 7 bis Zona PIP, 83100 Manocalzati (AV), Italy

Sono stati esaminati provini di malta prismatici 40mm x 40mm x 160mm rinforzati all'1% in volume con strisce di PET ricavate dal taglio manuale di bottiglie di plastica da riciclo.

Per la realizzazione dei provini è stata utilizzata la malta *Disbocret Unitech R4*, malta cementizia fibrorinforzata idonea per ripristini di elementi in calcestruzzo con spessori in applicazione da 1 a 5 cm.

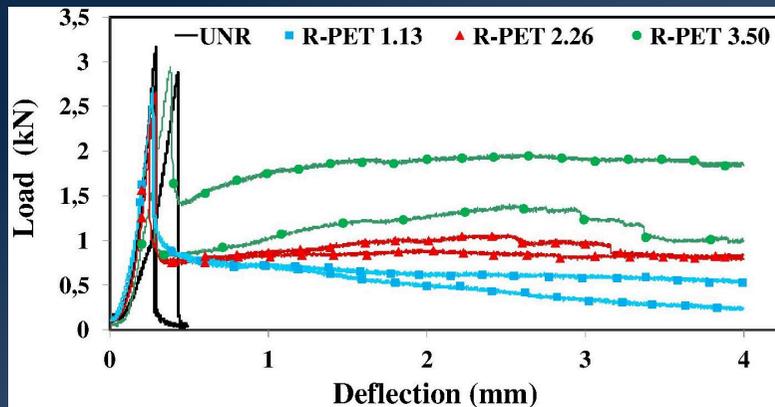
Le strisce di PET sono state ottenute rimuovendo prima il collo ed il fondo della bottiglia e successivamente tagliando la restante superficie laterale in strisce di larghezza pari a 2cm e di tre differenti lunghezze: 11.3 mm ('R-PET 1.13'); 22.6 mm ('R-PET 2.26') e 35 mm ('R-PET 3.50').

I provini di malta fibrorinforzati ('R-PET 1.13'), ('R-PET 2.26') e ('R-PET 3.50') sono stati successivamente sottoposti a test di resistenza a flessione su tre punti e sono stati misurati i valori medi della resistenza di prima fessurazione, gli indici di duttilità ed i fattori di resistenza residua.

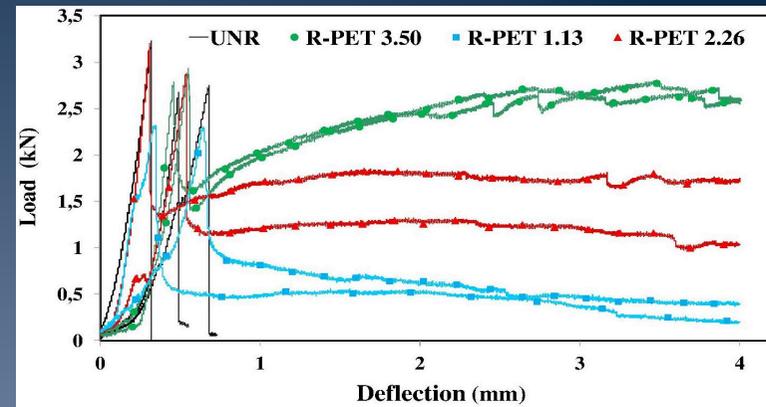


Risultati test flessione e resistenza di prima fessurazione

Nei grafici che seguono sono illustrate le curve load-deflection a 7 e 28 giorni di maturazione. Le tabelle riportano i valori medi e le deviazioni standard dei risultati ottenuti dai provini fibrorinforzati e non a 7 e 28 giorni comparandoli con risultati ottenuti da uno studio analogo condotto da Pereira de Oilvera e A.Castro-Gomes su provini di malta commerciale rinforzati con strisce di PET di lunghezza pari a 35mm (R-PET-CLM) e provini non rinforzati (UNR-CLM).



Load-deflection curves of tested mortars at 7 days



Load-deflection curves of tested mortars at 28 days

Table 1

First-crack strengths at 7 days.

Material Id	Avg. (MPa)	St.Dev. (N/mm ²)	FRR (%)
UNR	2.93	0.22	0
R-PET 1.13	2.47	0.36	-15.6
R-PET 2.26	2.53	0.17	-13.7
R-PET 3.50	2.76	0.16	-5.7
UNR-CLM	0.80	0.05	0
R-PET-CLM	1.56	0.14	+95.0

Table 2

First-crack strengths at 28 days.

Material Id	Avg. (MPa)	St.Dev. (N/mm ²)	FRR (%)
UNR	2.88	0.30	0
R-PET 1.13	2.31	0.01	-19.79
R-PET 2.26	2.83	0.39	-1.73
R-PET 3.50	2.86	0.10	-0.69
UNR-CLM	1.03	0.02	0
R-PET-CLM	1.23	0.04	+19.41

Indici di duttilità e fattori di resistenza residua

Le tabelle 3 e 4 riportano i valori degli indici di duttilità e dei fattori di resistenza residui, ottenuti a 7 e a 28 giorni di maturazione.

Gli indici di duttilità sono stati misurati considerando l'area sotto la corrispondente curva load-deflection che è legata alla capacità di assorbimento di energia del materiale.

Come si evince dalla Tab.3, la malta R-PET 3.50 ha un fattore di resistenza residua maggiore di 100 in regime di post fessurazione a 28 giorni ($R_{5,10} = 135.22$, $R_{10,20} = 150.80$) a differenza della malta R-PET-CLM 3.50 per la quale invece si hanno valori di resistenza residua pari a $R_{5,10} = 86.3$, and $R_{10,30} = 87.5$.

Comparando le tabelle 3 e 4 si nota che i fattori di resistenza residua aumentano all'aumentare del periodo di maturazione per tutti i provini esaminati nel presente studio. I maggiori incrementi di resistenza residua sono stati ottenuti per la malta R-PET 3.50 mortar.

Table 3

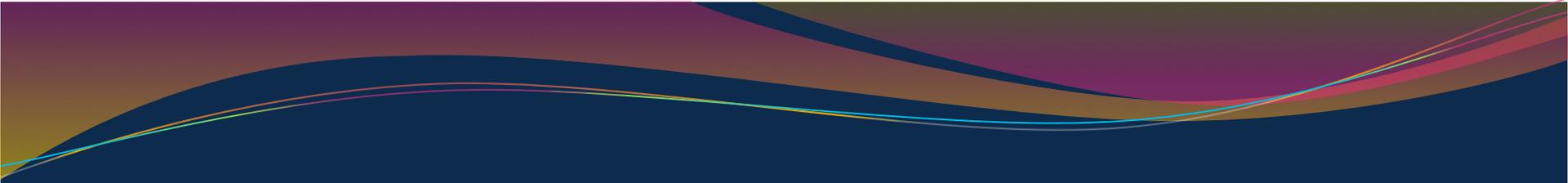
Average flexural toughness indices and residual strength factors at 7 days.

Material Id	I_5	I_{10}	$I_{20} (I_{30})$	$R_{5,10}$	$R_{10,20} (R_{10,30})$
R-PET 1.13	2.09	3.06	3.98	19.29	11.37
R-PET 2.26	3.10	5.51	9.43	56.72	39.25
R-PET 3.50	3.47	7.12	13.90	72.88	67.84
R-PET-CLM	5.2	10.5	(28.8)	104.2	(91.9)

Table 4

Average flexural toughness indices and residual strength factors at 28 days.

Material Id	I_5	I_{10}	$I_{20} (I_{30})$	$R_{5,10}$	$R_{10,20} (R_{10,30})$
R-PET 1.13	2.25	3.39	4.08	22.74	14.29
R-PET 2.26	3.13	5.96	11.91	57.22	59.35
R-PET 3.50	5.29	12.05	27.13	135.22	150.80
R-PET-CLM	5.1	9.8	(27.3)	86.3	(87.5)



Conclusioni e lavoro futuro

I risultati dell'indagine teorico-sperimentale presentata in questo studio dimostrano che i prodotti della linea Hi-Tech della Caparol presi in esame hanno esplicato una notevole azione protettiva e/o di ripristino dei provini analizzati.

Per quanto riguarda specificamente la protezione nei confronti della carbonatazione, si è osservato che il calcestruzzo protetto con il rivestimento acrilico Disbocret 515 Betonfarbe (AC 515) ha esibito una profondità di carbonatazione, sotto test in camera di carbonatazione accelerata a 90 giorni, che è ridotta del 38% rispetto a quella esibita dal calcestruzzo non protetto. Il calcestruzzo protetto con il rivestimento cementizio Disbocret 519 (CM 519) ha invece mostrato una riduzione della profondità di carbonatazione pari a circa il 30%, sempre per confronto con il caso UNRC.

E' da presumersi che tali abbattimenti siano destinati a crescere sensibilmente in ampiezza con il prolungarsi dell'esposizione alla CO₂, sulla base delle risultanze disponibili in merito nella letteratura tecnica.

La protezione esplicata dal rivestimento acrilico Disbocret 515 nei confronti degli attacchi chimici da cloruri e solfati è risultata anch'essa di consistente entità.

Il prodotto Disbocret 515 ha dimostrato ottime proprietà protettive anche nei confronti della resistenza meccanica a compressione del calcestruzzo, sotto attacchi fisico-chimici dovuti all'azione combinata di cicli di gelo/disgelo, attacchi con cloruro di sodio ed attacchi con solfato di sodio. Si è mostrato che la diminuzione massima di resistenza a compressione, per effetto di tali attacchi, è contenuta nell'ordine del 10% in presenza di protezione superficiale con Disbocret 515. Tale diminuzione si attesta sui valori più bassi per calcestruzzi protetti e non protetti, soggetti agli stessi tipi di attacchi, tra quelli attualmente disponibili in letteratura.

Per quanto concerne i ripristini del calcestruzzo deteriorato con la malta Disbocret 504 Protec plus, l'analisi svolta ha dimostrato che essi sono in grado di aumentare significativamente la resistenza di fessurazione e la duttilità del calcestruzzo risanato.

Gli incrementi di duttilità in condizioni ultime (danneggiamento meccanico elevato) sono risultati particolarmente significativi, sia nel caso del rinforzo con il prodotto Disbocret 504 base (+236% rispetto al calcestruzzo non ripristinato), sia nel caso dei rinforzi che prevedono l'aggiunta di fibre PET da riciclo durante la fase di applicazione del prodotto sul supporto (incremento di duttilità ultima pari a +491% rispetto al calcestruzzo non ripristinato).

Questi elevatissimi incrementi di duttilità ultima sono da attribuirsi alla presenza di fibre polimeriche nella malta, che si sono dimostrate in grado di "correggere" significativamente la fragilità del materiale base, conferendogli sensibili capacità di duttilità e di dissipazione di energia.

Si ritiene quindi di poter affermare che ripristini del calcestruzzo deteriorato con opportune malte fibro-rinforzate su spessori consistenti siano fortemente consigliabili, soprattutto nel caso di interventi su manufatti ricadenti in zona sismica. Questi ultimi affidano infatti gran parte della loro resistenza al collasso (sotto eventi estremi) alla capacità di dissipazione energetica, al livello del materiale e della struttura nel suo insieme.

Un'ultima considerazione conclusiva che emerge dal presente studio riguarda la necessità di rivedere la definizione di vita utile attualmente fornita dalla norme tecniche vigenti (D.M. 14/01/2008), al fine di introdurre in essa opportuni coefficienti correttivi, che tengano conto della presenza o meno di trattamenti protettivi di comprovata efficienza.

In questa direzione si muove, in effetti, l'Eurocodice 2, che lega la vita utile di una struttura in conglomerato cementizio armato al copriferro delle armature e quest'ultimo, a sua volta, alla presenza o meno di protezioni del materiale. Tale prescrizione potrebbe essere utilmente percepita dalle norme vigenti sul territorio nazionale, introducendo eventualmente la richiesta di opportune certificazioni e/o test di qualificazione dei prodotti protettivi impiegati.

Bibliografia

- ✓ A.A. Almusallam, F.M. Khan, S.U. Dulaijan, O.S.B. Al-Amoudi, 2003. Effectiveness of surface coatings in improving concrete durability, *Cement & Concrete Composites* 25, 473-481.
- ✓ A. Borsoi, J.J. Ogoumah Olagot, F. Simonelli, R. Troli, 2008. Influenza della resistenza meccanica del calcestruzzo sulla carbonatazione, *Enco Journal* 42, 10-15.
- ✓ L. Coppola, M. Collepari, C. Pistolesi, P. Zaffaroni, 1994. Silani, pitture acriliche e rivestimenti elastici per la durabilità di strutture in calcestruzzo. (<http://www.encosrl.it/enco%20srl%20ITA/servizi/pdf/degrado/37.pdf>).
- ✓ M. Collepari, S. Collepari, J.J. Ogoumah Olagot, F. Simonelli, R. Troli, 2010. *Diagnosi del Degrado e Restauro delle Strutture in C.A.*, Seconda Edizione, Enco S.r.l., Ponzano Veneto (TV).
- ✓ M. Collepari, S. Collepari, R. Troli, 2006/a. Calcestruzzi a durabilità secolare – Parte 1: strutture esposte all'aria, *Enco Journal* 34, Ponzano Veneto (TV).
- ✓ M. Collepari, J.J. Ogoumah Olagot, F. Simonelli, R. Troli, 2006/b. Attacco dei cloruri sulle strutture in c.a., *Enco Journal* 35, Ponzano Veneto (TV).
- ✓ F. Fraternali, V. Ciancia, R. Chechile, G. Rizzano, L. Feo, L. Incarnato, 2011. Experimental study of the thermo-mechanical properties of recycled PET fiber reinforced concrete, *Composite Structures* 93, 2368–2374.

- ✓ D.M. 14/01/2008 – Norme tecniche per le costruzioni (Gazzetta Ufficiale n. 29 del 4 febbraio 2008 - Suppl. Ordinario n. 30).
- ✓ CNR-DT 204/2006, Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture di calcestruzzo fibrorinforzate, Congresso Nazionale delle Ricerche, Roma.
- ✓ UNI EN 197-1:2001 Cemento – Composizione, specificazioni e criteri di conformità per cementi comuni. Edizioni UNI, Milano.
- ✓ UNI 12620:2008 – Aggregati per calcestruzzo. Edizioni UNI, Milano.
- ✓ UNI EN 1008:2003 - Acqua di impasto per il calcestruzzo – Specifiche di campionamento, di prova e di valutazione dell'idoneità dell'acqua, incluse le acque di recupero dei processi dell'industria del calcestruzzo, come acqua di impasto del calcestruzzo. Edizioni UNI, Milano.
- ✓ UNI EN 206 – 1:2006 – Calcestruzzo – Specificazione, prestazione, produzione e conformità. Edizioni UNI, Milano.
- ✓ UNI 11104:2004 – Calcestruzzo – Specificazione, prestazione, produzione e conformità – Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 206-1. Edizioni UNI, Milano.
- ✓ UNI EN 12390 – 3:2009 – Prove su calcestruzzo indurito – Parte 3: Resistenza alla compressione dei provini. Edizioni UNI, Milano.

- ✓UNI EN 1015-11:2007 – Metodi di prova per malte per opere murarie – Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita. Edizioni UNI, Milano.
- ✓UNI EN 11039-1:2003 – Calcestruzzo rinforzato con fibre di acciaio – Definizioni, classificazioni e designazione. Edizioni UNI, Milano.
- ✓UNI EN 11039-2:2003 – Calcestruzzo rinforzato con fibre di acciaio – Metodo di prova per la determinazione della resistenza di prima fessurazione e degli indici di duttilità. Edizioni UNI, Milano.
- ✓UNI EN 13295:2005 – Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo – Metodi di prova – Determinazione della resistenza alla carbonatazione. Edizioni UNI, Milano.
- ✓UNI EN 196-1:2005 – Metodi di prova dei cementi – Parte 1: Determinazione delle resistenze meccaniche. Edizioni UNI, Milano.
- ✓UNI EN 1744-1:2010 – Prove per determinare le proprietà chimiche degli aggregati - Analisi chimica. Edizioni UNI, Milano.
- ✓UNI EN 932 – 1:1998 – Metodi di prova per determinare le proprietà generali degli aggregati. Metodi di campionamento. Edizioni UNI, Milano.

**Grazie della cortese
attenzione**

