

Durability of FRC beams exposed for long-term under sustained loading

Durabilità di travi FRC esposte a lungo termine sotto carico di esercizio

L. Candido¹, F. Micelli¹, E. Vasanelli², M. A. Aiello¹, G. Plizzari³

¹ *Department of Engineering for Innovation, University of Salento, Lecce, Italy*

² *CNR-IBAM, Lecce, Italy*

³ *DICATAM, University of Brescia, Italy*

ABSTRACT: Fiber Reinforced Concrete (FRC) is a material obtained by adding short fibers within the concrete matrix. Fibers resist the crack opening and develop tensile residual strength. The research presented herein shows the results of an experimental program that was carried out in about six years. Thirteen beams were tested; ten of them were subjected to sustained flexural load in external environment. The experimental variables that were investigated are: the type of short fibers (steel and polyester), the duration of the sustained load (0, 17 and 72 months). The results show the effects of such conditioning in terms of mechanical properties and durability of concrete. / Il calcestruzzo fibro-rinforzato (FRC) si ottiene aggiungendo fibre corte strutturali ad una matrice di calcestruzzo. Le fibre resistono alla formazione di fessure sviluppando una resistenza residua a trazione. La ricerca qui presentata illustra i risultati ottenuti nell'ambito di una campagna sperimentale su travi in FRC che ha avuto la durata di circa sette anni. Tredici travi in calcestruzzo armato ordinario e fibrorinforzato sono state testate in laboratorio, dieci delle quali dopo esposizione a carichi di lunga durata in ambiente esterno. Le variabili sperimentali indagate sono il tipo di fibra corta (acciaio e poliestere) e la durata dell'esposizione (0 mesi, 17 mesi e 72 mesi). I risultati mostrano gli effetti del condizionamento in termini di prestazioni meccaniche e durabilità del calcestruzzo.

KEYWORDS: fibre-reinforced concrete; long-term loading; Serviceability Limit State / calcestruzzo fibro-rinforzato; carichi di lungo termine; Stato Limite di Servizio

1 INTRODUZIONE

La presenza di fibre corte nella matrice di calcestruzzo contribuisce a controllare o ritardare i fenomeni fessurativi (Di Prisco et al. 2009) ed a maturare effetti tempo-dipendenti moderati (Tan et al. 1995, Altoubat et al. 2003). Gli elementi in FRC sviluppano una migliorata tenacità e duttilità sotto carichi dinamici e sismici, così come in condizioni statiche e di fatica (Filiatrault et al. 1995, Parra-Montesinos & Wight 2000, Parra-Montesinos 2005). Inoltre, essi sviluppano normalmente un numero maggiore di fessure ma con larghezza di apertura minore se confrontati con elementi in calcestruzzo ordinario. Perciò, il materiale FRC è potenzialmente più efficace contro la penetrazione di agenti contaminanti, ritardando la corrosione delle barre d'armatura. Pertanto, tali materiali offrono una prospettiva di una prolungata vita utile, in particolare in ambienti aggressivi. Al momento esistono pochi modelli in grado di predire accuratamente la spaziatura e la larghezza dell'apertura negli elementi in FRC sotto carichi flessionali (Tan et al. 1995, Altoubat et al. 2003, Vasanelli et al. 2014), a causa di una ridotta disponibilità di campagne sperimentali. Tuttavia, relazioni ana-

litiche si rendono necessarie data la diffusione di tali materiali nel settore delle costruzioni. Le normative RILEM TC 162 TDF e fib Model Code (MC) 2010 hanno iniziato proposto delle equazioni, e gli effetti di lungo termine rivestono una importanza cruciale nel mondo della ricerca.

Il presente lavoro è incentrato sul comportamento fessurativo e sulla durabilità di travi FRC in scala reale rinforzate con armatura longitudinale convenzionale e staffe, lasciate in ambiente esterno sotto carico sostenuto fino a 72 mesi. Successivamente le travi sono state portate a rottura in una prova di flessione a quattro punti. Infine, prove di penetrazione di ioni cloruro e profondità di carbonatazione sono state eseguite al fine di valutare lo stato delle travi stesse.

2 CAMPAGNA SPERIMENTALE

Lo scopo del lavoro è investigare gli effetti di lungo termine sulle proprietà strutturali di travi armate e fibro-rinforzate, come già illustrato in Vasanelli et al. (2013). Tredici travi sono state gettate e lasciate in laboratorio per circa un anno. Il primo gruppo di

travi include tre travi armate di cui una gettata con calcestruzzo ordinario e due con calcestruzzi fibrorinforzati rispettivamente con fibre di acciaio e poliestere. Queste travi sono state testate in laboratorio (L) senza essere state esposte e sono considerate il riferimento per l'intera campagna sperimentale. Le rimanenti dieci travi sono state esposte all'esterno (E), soggette ad un carico sostenuto di circa 50 kN, con il fine di simulare un carico in condizioni di esercizio. Queste dieci travi sono suddivise in due gruppi di cinque, di cui il primo gruppo è rimasto esposto per circa 17 mesi (17) e poi testato, mentre il secondo gruppo di travi è rimasto esposto per 72 mesi (72) e poi testato. In entrambi i gruppi erano presenti una trave in calcestruzzo ordinario (PC), due travi in calcestruzzo fibrorinforzato con fibre di acciaio (ST) e due con fibre di poliestere (POL). La Tabella 1 riporta i dettagli delle travi inclusi i codici identificativi, il tempo di esposizione ed il tempo del test dal getto. La campagna di indagine sugli effetti di lungo termine è stata effettuata in due fasi successive alla caratterizzazione del materiale. La prima fase si è svolta in sito allo scopo di rilevare e monitorare l'evoluzione del quadro fessurativo in termini di posizione, larghezza e lunghezza delle fessure sulle travi esposte sotto carico. La seconda fase si è svolta in laboratorio ed ha riguardato le prove di flessione su quattro punti. La Tabella 2 riporta le proprietà meccaniche medie delle barre longitudinali e delle staffe, ottenute come media di tre test eseguite secondo la UNI EN ISO 15630-1. Due diversi tipi di fibre sono stati impiegati: quelle in poliestere (PE30) e quelle in acciaio (60x30). I rapporti di aspetto (lunghezza/diametro) erano rispettivamente uguali a 50 e 66 per le fibre in acciaio e poliestere. Le proprietà geometriche e meccaniche delle fibre usate sono riportate in Tabella 3. Pertanto, sono stati preparati tre mix: uno di riferimento in calcestruzzo bianco (PC), uno in calcestruzzo con fibre di acciaio in quantità di 0.6% in volume (ST) e uno con fibre di poliestere in quantità dello 0.9% (POL). Tali quantità sono state scelte sulla base di esperienze precedenti, con lo scopo di avere il miglior compromesso tra caratteristiche meccaniche e lavorabilità del calcestruzzo. Tutti i mix hanno rapporto acqua-cemento pari a 0.65 e cemento tipo 32.5R II_A/LL (UNI EN 196-1, come per Tabella 4) e classe di lavorabilità S5. Quattro cubetti (150 x 150 x 150 mm) per ogni mix (PC, ST e POL) sono testati per controllo di qualità; i valori di resistenza raggiunti dopo 28 giorni dal getto sono riportati in Tabella 5. La resistenza a compressione dei getti ST è circa pari a quella dei getti POL ma entrambi sono leggermente inferiori a quella raggiunta dal PC. Ciò sembra piuttosto dovuto ad un maggiore contenuto di aria intrappolata nel mix durante la preparazione dei getti, come già ipotizzato in Vasanelli et al. (2013). La presenza di fibre - nelle basse quantità adottate - non influenza il comportamento a compressione (ACI

Committee 544) e non può essere quindi ritenuta la causa del minor valore di resistenza a compressione dei calcestruzzi fibrorinforzati. La Tabella 5 riporta inoltre i valori di f_{R1} , come definiti nel Model Code 2010. Questi valori sono ottenuti tramite analisi inversa operata sulla curva carico-apertura CMOD su provini intagliati di medesimo mix soggetti ad una prova di tenacità.

Le travi sono state mantenute sotto un carico permanente che simulava la situazione di esercizio in combinazione rara. I telai nel sito di esposizione sono illustrati in Figura 1. Lo schema di carico rappresenta una configurazione di flessione a quattro punti con una lunghezza libera tra gli appoggi di 280 cm ed una distanza tra i coltelli di carico di 90 cm. Le travi sono state progettate secondo le disposizioni contenute nell'Eurocodice 2, sulla base dello schema riportato in Figura 2(a). Le travi sono lunghe 300 cm ed hanno sezione quadrata di 25 cm di lato. Sui lembi compresso e teso sono stati rispettivamente disposte 2 e 3 barre $\phi 14$ mm, mentre si è adottata una staffatura passo 14 cm nella zona tra i coltelli di carico e passo 7 cm tra i coltelli di carico e i supporti. La percentuale geometrica di armatura è stata progettata al fine di avere una modalità di rottura per schiacciamento del calcestruzzo compresso e concorrente snervamento delle barre tese. Le staffe sono invece state posizionate allo scopo di evitare rotture premature a taglio. La Figura 2(a) mostra la geometria delle travi ed i dettagli di armatura, mentre la Figura 2(b) mostra il set-up reale del telaio di carico.

I due telai di carico sono collocati in un'area industriale a Brindisi, a circa 600 m di distanza dal mare. Il sito presenta umidità relativa $>70\%$ e presenza di ioni cloruro nell'aria, risultando in classe di esposizione XC3, secondo le EN 206-1. Il carico applicato durante tutto il periodo di esposizione è di 50 kN, pari a circa il 50% del carico ultimo di progetto. A causa dei possibili effetti di rilassamento del sistema di carico, le travi sono state periodicamente ricaricate al fine di mantenere costante il carico applicato. Per le misure delle fessure in sito si è usato un microscopio digitale con fattore di scala 200x. Dopo un anno dal getto, le travi di laboratorio, non esposte, sono state testate nella prova a quattro punti riportata in Figura 2, a controllo di carico con una cella di carico di capacità pari a 30 tonnellate. Durante il test si sono misurati gli abbassamenti in mezzeria e ai quarti della lunghezza, tramite tre trasduttori (LVDT), e le aperture delle fessure. Il quadro fessurativo delle travi esposte, in termini di numero, larghezza e lunghezza delle fessure, è stato rilevato in cinque step di carico: Step 1=20 kN; Step 2=30 kN; Step 3=50 kN; Step 4=80 kN; Step 5=100 kN. Le travi esposte sono state testate fino al collasso rispettivamente dopo 29 e 84 mesi dal getto.

Table 1. ID, time of exposure and time at testing / Codice ID, tempi di esposizione e di test dal getto.

ID	Tempo di esposizione (Mesi)	Tempo dal getto (Mesi)
PC_L / ST_L / POL_L	-	12
PC_E_ST/ST_E_ST/POL_E_ST	17	29
PC_L / ST_L / POL_L	72	84

Table 2. Steel mechanical properties / Proprietà meccaniche acciai.

Acciaio	Diametro (mm)	Tensione snervamento (Mpa)	Tensione rottura (Mpa)	Allung. rottura (%)
Barre long.	14	520	614	12.2
Staffe	8	567	600	4.8

Table 3. Mechanical and geometrical properties of fibres / Proprietà meccaniche e geometriche delle fibre.

Tipo fibra	forma	Diam. (µm)	Lungh. (mm)	Resistenza a trazione (Mpa)	Modulo elastico (kN/mmq)
Acciaio	uncino	600	30	> 1150	210
Poliestere	ondulata	450	30	400-800	11.3

Table 4. Mix design / Mix design.

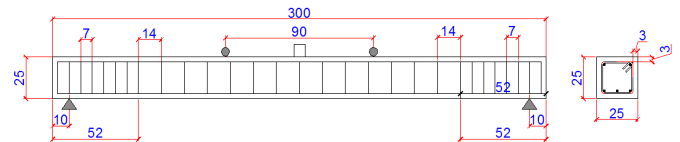
	ST	POL	PC
CEM 32.5R II-A/LL (kg/m3)	300	300	300
Superplasticizzante CRTV-L (kg/m3)	1.59	2.5	1.77
Sabbia (0-4) (kg/m3)	1028	1023	1037
Aggregati (4-10) (kg/m3)	704	701	710
Rapporto acqua/cemento	0.65	0.65	0.65
Percentuale di fibra (%)	0.6	0.9	-

Table 5. Concrete cubic compressive strength / Resistenza cubica a compressione del calcestruzzo.

Codice	Resistenza media (MPa)	COV (%)	f _{R1} (MPa)
PC	25.80	4	-
ST	21.40	8	0,88
POL	23.20	8	0,40



Figure 1. Loading frames on site / Telai di carico in sito.



(a)



(b)

Figure 2. (a) Beam details (cm); (b) experimental set-up / (a) dettagli della trave (cm); (b) set-up sperimentale.

3 RISULTATI E DISCUSSIONE

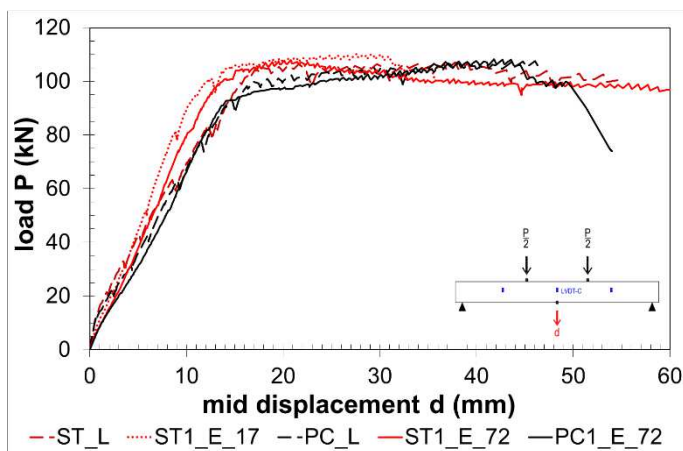
3.1 Comportamento meccanico

I risultati sperimentali ottenuti per le travi esposte per 17 mesi sono stati presentati in Vasanelli et al. (2013) e uno studio preliminare del comportamento meccanico delle travi esposte per 72 mesi è presentato in Candido et al. (2015).

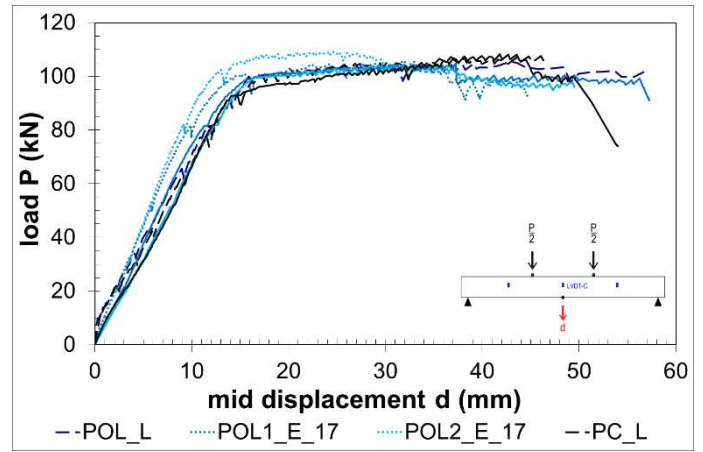
Tutte le travi hanno raggiunto lo stato limite ultimo per schiacciamento del calcestruzzo compresso in condizione di armatura tesa snervata, secondo calcolo. La Figura 3 mostra le curve carico-abbassamento in mezzzeria per le travi testate, suddivise per tipo di calcestruzzo e tempo di esposizione. La Figura 3(a) e (b) si riferisce alle travi fibrorinforzate in acciaio e poliestere rispettivamente. Nella stessa figura, le curve relative alle travi PC sono riportate, per confronto, in nero. Si può osservare come, dopo 72 mesi di esposizione sotto carico costante, le travi FRC hanno performance migliori o, al limite, equivalenti a quella della trave PC non esposta e non assoggettata al carico. Pertanto, il beneficio della presenza di fibre sul comportamento a lungo termine di travi normalmente armate, esposte all'esterno sotto un carico di esercizio costante, può essere interpretato come un ritardo dell'inizio degli effetti tempo-dipendenti di corrispondenti travi ordinarie non esposte. E' inoltre opportuno osservare che il contributo alla resistenza flessionale delle travi dovuto alla presenza di fibra corta è trascurabile, a causa del modesto contenuto delle stesse e della presenza di un quantitativo ordinario di barre longitudinali. Inoltre, vi è una differenza nel comportamento

tra le travi PC e FRC esposte per 72 mesi, sotto il valore del carico applicato.

La Tabella 6 riporta i risultati dei test in termini di rigidità secante (calcolata tra 0 e 50 kN) indici di duttilità e carico ultimo e di snervamento delle barre tese mentre la tabella 7 riporta i rispettivi valori di abbassamento in mezzera per ogni step di carico. Una misura della duttilità è fornita dal rapporto tra il carico ultimo e quello di snervamento delle barre. La rigidità flessionale delle travi FRC esposte per 72 mesi è superiore a quella delle travi PC di riferimento. In particolare le travi fibrorinforzate con fibre di acciaio hanno incrementi pari al 12-21%, mentre quelle con fibre di acciaio mostrano incrementi minori (3-17%). Le travi esposte per 17 mesi mostrano i massimi valori di rigidità. In ogni caso, i valori di rigidità delle travi esposte per 72 mesi sono prossimi a quelli delle travi di laboratorio, non esposte. Le travi esposte tuttavia mostrano una rigidità minore nel tratto di curva riportato sotto il valore del carico applicato. Essendo l'effetto maggiormente marcato per la trave PC, come si deduce dalla Figura 3, la presenza delle fibre è benefica anche per contenere gli effetti del carico prolungato. Al di sopra di un livello di carico di 80 kN non si evidenziano effetti tempo-dipendenti per tutte le travi. Il contributo delle fibre nel comportamento elastico è inoltre dimostrato dal generale aumento nel valore di carico di snervamento per le barre tese. In ogni caso, il contributo delle fibre tese sul valore di carico ultimo non è così determinante, come anche riportato in precedenti lavori presenti nella letteratura scientifica (Swamy and Sa'ad 1981, Tan et al. 1998, Abdul-Ahad Ramzi & Aziz 1999). Inoltre, i valori di duttilità delle travi FRC mostrano un minimo incremento per le travi con fibre di poliestere ed un incremento, fino al 20%, per le travi con fibre di acciaio. Le duttilità medie per tipologia di getto, rispettivamente PC, POL e ST, valgono 3.5, 3.62 e 4.18.



(a)



(b)

Figure 3. (a) Load vs midspan displacement for beams: (a) steel FRC; (b) polyester FRC / Curva carico abbassamento per le travi: (a) fibre acciaio; (b) fibre poliestere.

Table 6. Mechanical properties of beams / Comportamento meccanico delle travi.

Codice ID	Rigidità (kN/m)		Duttilità	Carico Ultimo (kN)	Carico snervam. acciaio (kN)
	0-50kN	Δ^*			
PC_L	7027	-	3.51	107.62	84.24
POL_L	7246	3%	3.14	105.52	88.03
ST_L	7849	12%	3.78	107.12	91.43
PC1_E_17	6303	-	3.47	104.42	88.33
POL1_E_17	8865	41%	4.01	105.82	87.84
POL2_E_17	9016	43%	3.68	110.92	90.23
ST1_E_17	8956	42%	3.46	110.42	91.93
ST2_E_17	9891	57%	3.93	117.41	92.93
PC_E_72	6312	-	3.54	108.12	92.50
POL1_E_72	7365	17%	4.03	104.72	94.93
POL2_E_72	6554	4%	3.25	104.42	94.13
ST1_E_72	7653	21%	5.39	107.92	95.23
ST2_E_72	7210	14%	4.33	110.42	98.73

Δ^* = % di variazione della rigidità rispetto alle travi PC di riferimento

Table 7. Midspan displacement for beams during bending test / Abbassamento travi in mezzera durante la prova di flessione.

Codice ID	Abbassamento in mezzera (mm)				
	20 kN	30kN	50kN	80kN	collasso
PC_L	1.94	3.99	7.10	12.39	45.42
POL_L	1.42	2.74	6.90	11.55	41.38
ST_L	1.54	3.06	6.37	11.67	53.36
PC1_E_17	3.53	5.08	7.93	11.47	46.10
POL1_E_17	2.03	3.35	5.64	9.550	44.61
POL2_E_17	2.20	3.36	5.54	8.880	37.92
ST1_E_17	2.27	3.40	5.58	8.630	35.82
ST2_E_17	1.56	2.80	5.05	8.260	38.16
PC_E_72	3.03	4.80	7.92	11.86	49.50
POL1_E_72	2.79	4.16	6.78	10.97	56.47
POL2_E_72	3.20	4.69	7.62	12.00	49.75
ST1_E_72	2.72	4.04	6.53	10.13	65.70
ST2_E_72	2.98	4.37	6.93	10.80	46.99

3.2 Comportamento fessurativo

Il comportamento fessurativo delle travi esposte per 72 mesi è stato preliminarmente analizzato in Candido et al. (2015). La Figura 4 riporta i valori medi di apertura delle fessure nella zona a momento costante delle travi esposte. In particolare, la Figura 4(a) mostra il valore medio delle fessure misurato in sito per le travi esposte per 72 mesi, mentre la Figura 4(b) mostra i corrispondenti valori misurati durante la prova di flessione a quattro punti in laboratorio. Nella figura, i valori corrispondenti a carico nullo (0 kN) sono quelli residui, riferiti alle travi esposte in condizione scarica prima di iniziare la prova.

La Tabella 8 riporta il numero di fessure, la distanza media e la larghezza delle fessure per tutte le travi esposte, relative ad un carico di intensità 50 kN ed alla zona di momento costante. Il numero di fessure nelle travi PC è sempre 7, proprio pari al numero di staffe contenute tra i coltelli di carico. Nelle travi FRC il numero di fessure è uguale o di poco superiore (7-9), inclusi eventuali sdoppiamenti nelle diramazioni delle fessure. Inoltre la larghezza totale delle fessure nelle travi FRC è inferiore del 30% rispetto alle travi di riferimento PC.

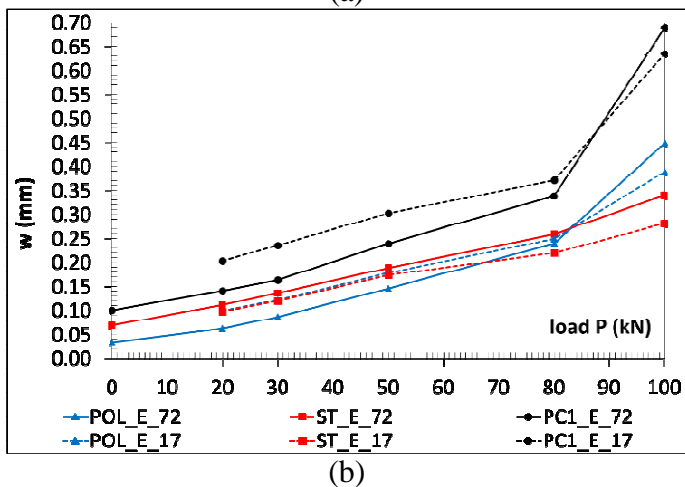
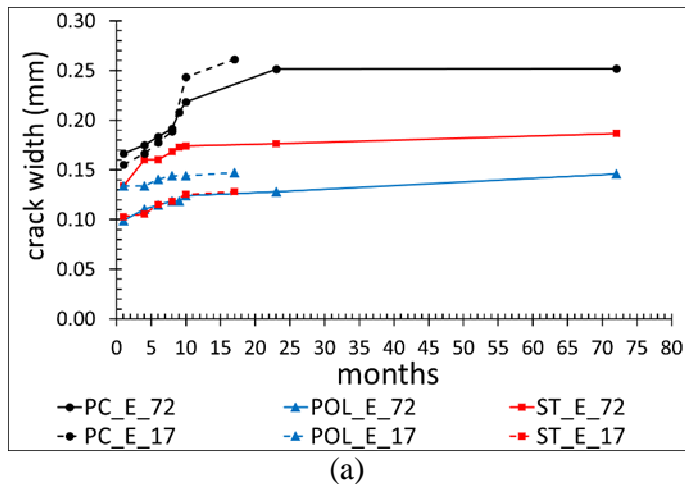


Figure 4. (a) Mean crack width along the constant moment zone: (a) vs time, measured on site; (b) vs load, measured in laboratory / Apertura media delle fessure nella zona a momento costante: (a) vs tempo, misurate in sito; (b) vs carico, misurato in laboratorio.

Le Tabelle 9 e 10 riportano le previsioni analitiche dei valori medi di spaziatura e larghezza delle fessure secondo il Model Code 2010, rispettivamente per il breve termine e per il lungo termine con riferimento alla formazione della fessura. Per il calcolo di tali valori è stato utilizzato l'approccio seguito da Tiberti et al. (2015). I valori in parentesi sono quelli effettivamente misurati nella campagna sperimentale. Come si può osservare le previsioni per le travi PC risultano i più affidabili, mentre per le travi FRC le previsioni si distanziano dai valori effettivamente misurati. Inoltre, la campagna sperimentale presentata non ha mostrato una evoluzione nel tempo nel numero di fessure, e pertanto nel valore di spaziatura media, per un dato livello di carico. Nell'esperienza degli autori, il numero di fessure varia esclusivamente con il livello di carico applicato. Di fatto, in tutte le travi testate l'influenza delle staffe è predominante. Infatti, le fessure si sono formate in corrispondenza delle staffe stesse. La formula analitica non è in grado di rilevare questo aspetto, in quanto sviluppata con particolare riferimento ad elementi FRC non staffati.

Table 8. Number, mean spacing and width of cracks along the constant moment zone / Numero, spaziatura media e larghezza media delle fessure nella zona a momento costante.

Codice ID	Numero totale fessure	Spaziatura media (cm)	Δ_1^*	Apertura media (mm)
POL1_E_72	8	11.69	-16.32%	0.138
POL2_E_72	7	14.19	1.57%	0.154
ST1_E_72	7	14.12	1.07%	0.181
ST2_E_72	7	14.09	0.86%	0.195
PC1_E_72	7	13.97	-	0.239
POL1_E_17	7	14.18	-0.14%	0.189
POL2_E_17	8	12.21	-14.01%	0.167
ST1_E_17	8	10.23	-27.96%	0.178
ST2_E_17	9	10.50	-26.06%	0.169
PC1_E_17	7	14.20	-	0.302

* Δ_1 = differenza tra i valori di spaziatura media per la trave in esame e la PC1_E appartenente al gruppo.

Table 9. Analytical prediction (MC2010) for crack spacing and width in short-term condition; in brackets experimental values / Predizione analitica per la spaziatura e apertura delle fessure a breve termine; valori sperimentali tra parentesi.

Codice ID	Breve Termine	
	Spaziatura s_{rm} (mm)	Larghezza w_d (mm)
PC_E_72	128 (141)	0.235 (0.160)
POL_E_72	107 (131)	0.182 (0.117)
ST_E_72	82 (123)	0.132 (0.119)

Table 10. Analytical prediction (MC2010) for crack spacing and width in long-term condition / Predizione analitica per la spaziatura e apertura delle fessure a lungo termine.

Codice ID	Breve Termine	
	Spaziatura s_{rm} (Mesi)	Larghezza w_d (Mesi)
PC_E_72	128 (141)	0.329 (0.252)
POL_E_72	107 (131)	0.262 (0.142)
ST_E_72	82 (123)	0.258 (0.196)

3.3 Durabilità

In seguito ai test meccanici le travi sono state tagliate a secco sia nella direzione trasversale che in quella longitudinale per effettuare le prove di durabilità, mirate a valutare la presenza di ioni cloruro e la profondità di carbonatazione. Per la prima prova si è effettuata una prova colorimetrica, con spruzzo di una soluzione di nitrato di argento (AgNO_3) ed esame con lampada a raggi infrarossi VGA per l'osservazione di eventuale reazione con viraggio del colore. In tal senso non si è assistito ad alcuna variazione colorimetrica, peraltro nemmeno a seguito di rialcalinizzazione della superfici testate. Pertanto, secondo gli studi di Meira et al. (2007) è plausibile che il peso di cloruri contenuto sia inferiore allo 0.012% del peso di calcestruzzo.

Le prove di profondità di carbonatazione, suddivise tra misurazione in corrispondenza delle fessure e lungo il calcestruzzo integro tra le fessure, hanno invece fornito risultati interessanti. La Tabella 11 riporta i valori medi, relativi alle misurazioni effettuate in entrambi i lati dei provini tagliati lungo la direzione longitudinale, per ogni singola trave esposta per 72 mesi distinguendo tra le sezioni fessurate e quelle non fessurate incluse tra due fessure successive. La Figura 5, invece, riporta le medie dei suddetti valori di profondità di carbonatazione per tipologia di mix. Si può osservare come per le travi FRC, in corrispondenza delle fessure di ampiezza e profondità inferiore rispetto al caso PC, si osservano valori inferiori di profondità di carbonatazione, con effetto benefico delle fibre. Al contrario, invece, nella zona di calcestruzzo integro tra le fessure le profondità di carbonatazione delle travi FRC è superiore rispetto al relativo caso PC. Tuttavia, questo risultato sembra potersi ascrivere ad una maggiore porosità del calcestruzzo fibrorinforzato caratterizzato da un contenuto di aria superiore rispetto al calcestruzzo ordinario. In effetti, allo stesso fenomeno dovuto a motivi implicati dalla lavorabilità dell'impasto, viene ascritto il minor valore di resistenza meccanica maturata dai calcestruzzi, come testimoniato dalla Tabella 5.

Table 11. Carbonation depth and associated standard deviation for beams exposed for 72 months / Profondità di carbonatazione e relativa deviazione standard per le travi esposte per 72 mesi.

Sezioni ID Trave	Non fessurate		Fessurate	
	Prof. Carbon. (mm)	Dev. Standard	Prof. Carbon. (mm)	Dev. Standard
PC	16.59	3.30	32.59	9.80
ST01	25.63	2.68	31.81	8.33
ST02	27.97	3.04	27.59	4.41
POL01	21.31	3.06	31.75	4.77
POL02	24.41	1.44	27.45	6.93

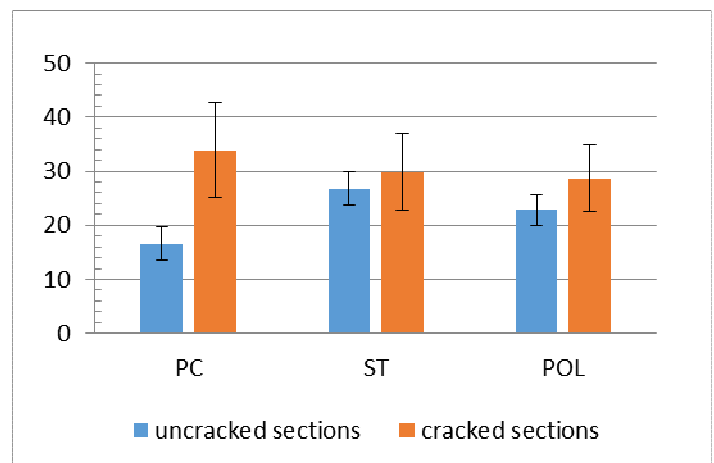


Figure 5. Carbonation depth (mm) in cracked and uncracked sections of beams exposed for 72 months / Profondità della carbonatazione (mm) nelle sezioni fessurate e non fessurate delle travi esposte per 72 mesi.

4 CONCLUSIONI

The experimental study presented herein focuses on the investigation of the long-term performance of normally reinforced RC/FRC beams exposed to weathering under sustained loading, as equal to the maximum value of the service loading. After exposure, of 17 and 72 months, the beams were unloaded and moved to the laboratory for a four-point bending test. The crack pattern and the deformation behavior were detected in situ during the exposure period and in laboratory during the final tests. The bending stiffness of all FRC beams is slightly greater than that of the corresponding PC beams, while the beams with steel fibers show the best mechanical performance in terms of capacity and flexural stiffness. The most pronounced effects of stiffness loss due to sustained loading occur for the PC beams, while the presence of fibers seems beneficial in limiting these effects and increasing ductility. Furthermore, the presence of fibers implies lower values of displacement and higher values of load at yielding of longitudinal reinforcing bars.

The crack openings evolve in time; therefore, design codes should account for time in the prediction of crack widths, aiming at avoiding the raise of disputes. Indeed, under sustained loading the evolution of crack opening stabilizes after 25 months for PC beams and long before, after only 10 months, for FRC beams. The addition of fibers in the concrete matrix helps reducing crack widths up to 50% when using the polyester fibers in an amount of 0.9% by volume. The FRC beams with polyester fibers showed smaller values of crack opening, for load levels up to 60 kN. However, for higher loading levels, steel fibers have proven to be most effective, although in lesser amounts compared to polyester ones (0.6%). Notice that steel and polyester fibers have different cross-sections, respectively prismatic and circular, and different mechanical properties; these parameters should be taken into account, directly or indirectly, in order to establish reliable analytical reports. Indeed, analytical predictions obtained using directions provided by Model Code 2010 are reliable for PC beams, but are inadequate for FRC members. For the latter, the presence of the stirrups should be included in the analytical formulations. As for durability, FRC beams have proved most efficient in preventing the entry of corrosive agents through cracks. In fact, cracks were less deep and wide as those arising in the ordinary concrete beams. However, probably due to a greater amount of entrapped air in fiber reinforced concretes, the same have shown a higher rate of carbonation depth in the concrete intact portions between cracks.

Concluding, FRC beams showed an improved mechanical and cracking behavior compared to plain concrete beams, with mitigation of time-dependent effects. Furthermore, the presence of fibers is beneficial in cracked sections where carbonation depth is lower than in plain concrete beams.

Lo studio sperimentale presentato è incentrato sugli effetti di lungo termine nella performance di travi normalmente armate in RC/FRC esposte all'ambiente esterno sotto carico sostenuto, pari al valore massimo dei carichi di esercizio. Dopo una esposizione prolungata di 17 e 72 mesi, le travi sono state scaricate e trasportate in laboratorio per essere assoggettate ad una prova di flessione a quattro punti. Il quadro fessurativo ed il comportamento deformativo sono stati rilevati durante il periodo di esposizione in sito e durante le prove finali in laboratorio. La rigidità flessionale di tutte le travi FRC è leggermente superiore a quella delle corrispondenti travi PC, mentre le travi con fibre di acciaio mostrano le migliori performance meccaniche in termini di capacità flessionale e rigidità. Gli effetti più pronunciati di perdita di rigidità per effetto del carico sostenuto si verificano per le travi PC, mentre la presenza di fibra sembra benefica nel con-

tenimento di tali effetti e nell'incremento modesto di duttilità. Inoltre, in presenza di fibra si ottengono minori abbassamenti e valori più alti di carico necessario per lo snervamento delle barre di armatura tesa. L'apertura delle fessure evolve nel tempo, richiedendo l'introduzione nei codici normativi del fattore tempo nella determinazione delle aperture, al fine di evitare l'insorgenza di liti. Infatti, sotto carichi sostenuti l'apertura delle fessure si stabilizza dopo 25 mesi per le travi PC e molto prima, dopo solo 10 mesi, per le travi FRC. L'aggiunta di fibre nella matrice di calcestruzzo contribuisce a ridurre l'apertura delle fibre, fino ad un 50% quando si usano fibre in poliestere in quantità dello 0.9% in volume, sia in condizione di carico che in assenza di carico. Le travi FRC con fibre di poliestere hanno mostrato i valori minori di apertura delle fessure, per livelli di carico fino a 60 kN. Tuttavia, per livelli di carico superiore le fibre di acciaio si sono dimostrate più efficaci, sebbene presenti in quantità minore rispetto a quelle di poliestere (0.6%). Le fibre in poliestere e quelle in acciaio hanno sezioni di forma differenti, rispettivamente prismatiche e circolari, e differenti proprietà meccaniche; questi parametri dovrebbero essere presi in conto, direttamente o indirettamente, al fine di definire relazioni analitiche affidabili. Inoltre, le predizioni analitiche ottenute usando le indicazioni contenute nel Model Code 2010 sono affidabili per le travi PC, mentre risultano inadeguate per le membrature FRC. Per questi ultimi, la presenza delle staffe dovrebbe essere tenuta in debita considerazione nelle formulazioni analitiche. Per quanto riguarda i fenomeni di durabilità, le travi FRC si sono dimostrate più performanti nell'impedire l'ingresso di agenti inquinanti e corrosivi in corrispondenza delle fessure, in quanto le stesse sono risultate meno profonde e larghe di quelle verificatesi in travi in calcestruzzo ordinario. Tuttavia, probabilmente dovuto ad un maggior quantitativo di aria contenuta nei calcestruzzi fibrorinforzati, gli stessi hanno mostrato una velocità superiore di profondità di carbonatazione nelle porzioni di calcestruzzo integro comprese tra le fessure. In definitiva, le travi FRC hanno mostrato un comportamento meccanico e fessurativo migliorato rispetto a quelle realizzate con calcestruzzi ordinari con limitazione degli effetti tempo-dipendenti. Inoltre, anche in termini di durabilità l'effetto delle fibre è stato benefico in corrispondenza delle sezioni fessurate.

REFERENCES

- Abdul-Ahad, R.B. & Aziz O.Q. 1999. Flexural strength of reinforced concrete T-beams with steel fibers. *Cement and Concrete Composites*, 21(4): 263-268.
- ACI Committee 544. Measurement of properties of Fiber Reinforced Concrete. *ACI Report 544.2R-89*, American Concrete Institute, Farmington Hillis.

- Altoubat, S.A. & Lange, D.A. 2003. A new look at tensile creep of fiber reinforced concrete. *ACI Special Publication*, 216: 143–160.
- Candido, L., Micelli, F., Vasaneli, E., Aiello, M.A. & Plizzari, G. 2015. Cracking behaviour of FRC beams under long-term loading. *CONCREEP 10*, 1147-1156.
- Di Prisco, M., Plizzari, G. & Vandewalle, L. 2009. Fibre reinforced concrete: new design perspectives. *Materials and Structures*, 42: 1261–1281.
- Eurocode 2. 2004. Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. EN 1992-1-1:2004.
- FIB Model Code. 2010. First complete draft. vol 2. chaps (7–10), in *fib Bulletin 562010*. ISBN 978-2-88394-096-3.
- Filiatrault, A. Pineau, S. & Houde, J. 1995. Seismic behavior of steel-fiber reinforced concrete interior beam-column joints. *ACI Structural Journal*, 92(5).
- Meira, G.R., Andrade, C., Padaratz, I.J., Alonso, C. & Borba, J. C. 2007. Chloride penetration into concrete structures in the marine atmosphere zone—relationship between deposition of chlorides on the wet candle and chlorides accumulated into concrete. *Cement and Concrete Composites*, 29(9): 667-676.
- Parra-Montesinos, G.J. & Wight, J.K. 2000. Seismic response of exterior RC column-to-steel beam connections. *Journal of Structural Engineering*. 126(10): 1113-1121.
- Parra-Montesinos, G.J. 2005. High-performance fiber-reinforced cement composites: an alternative for seismic design of structures. *ACI Structural Journal*, 102(5).
- Swamy, R.N. & Sa'ad, A. 1981. Deformation and ultimate strength in flexure of reinforced concrete beams made with steel fiber concrete. *Journal Proceedings*, 78(5).
- Tan, K.H., Paramasivam, P. & Tan, K.C. 1994. Instantaneous and long-term deflections of steel fiber reinforced concrete beams. *ACI Structural Journal*, 91(4): 384-393.
- Tan, K.H., Paramasivam, P. & Tan, K.C. 1995. Cracking characteristics of reinforced steel fiber concrete beams under short and long-term loadings. *Advanced Cement Based Materials*, 2: 127-137.
- Tiberti, G., Minelli, F. & Plizzari, G. 2015. Cracking behavior in reinforced concrete members with steel fibers: a comprehensive experimental study. *Cement and Concrete Research*, 68: 24-34.
- UNI EN 196-1. 2007. Cement - Part 1: Composition. specifications and conformity criteria for common cements. Italian Board of Standardization.
- UNI EN 206-1. 2001. Concrete – Specification, performance, production and conformity. Italian Board of Standardization.
- UNI EN ISO 15630-1. 2002. Steel for the reinforcement and pre-stressing of concrete - Test methods - Part 1: Reinforcing bars. wire rod and wire. Italian Board of Standardization.
- Vandewalle, L. 2000. RILEM TECHNICAL COMMITTEES - Recommendations of RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete', *Materials and Structures*, 33(225): 3-5.
- Vasaneli, E., Micelli, F., Aiello, M.A. & Plizzari, G. 2013. Long term behaviour of FRC flexural beams under sustained load. *Engineering Structures*, 56: 1858-1867.
- Vasaneli, E., Micelli, F., Aiello, M.A. & Plizzari, G. 2014. Crack width prediction of FRC beams in short and long term bending condition, *Materials and Structures*, 47(1-2): 39-54.