



Calcestruzzo autocompattante nanorinforzato (CNTSCC): proprietà meccaniche e potenzialità

Michela Ipperico, Giuseppe Ferro

Politecnico di Torino, Structural Engineering Department, Corso Duca degli Abruzzi, 24, 10129 Turin, Italy,
michela.ipperico@polito.it, giuseppe.ferro@polito.it

Simone Musso

Politecnico di Torino, Physics Department, Corso Duca degli Abruzzi, 24, 10129 Turin, Italy; simone.musso@polito.it

Jean-Marc Tulliani, Alberto Tagliaferro

Politecnico di Torino, Material Science and Chemical Engineering Department, Corso Duca degli Abruzzi, 24, 10129 Turin, Italy; jeanmarc.tulliani@polito.it, alberto.tagliaferro@polito.it

RIASSUNTO. Nel presente lavoro vengono presentati i risultati della campagna sperimentale condotta presso il Dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Torino sulla sperimentazione di una nuova tipologia di calcestruzzi autocompattanti fibrorinforzati: i *calcestruzzi autocompattanti nanorinforzati* (CNTSCC). Si tratta di calcestruzzi con basso rapporto a/c (0.4), contenenti additivi (superfluidificante e viscosizzante) e privi di aggregato grosso, nei quali il ruolo di “*fibra di rinforzo*” è svolto da Nanotubi al carbonio a parete multipla. Nella campagna sperimentale condotta sono state preparate due miscele di SCC, nanorinforzate con due differenti tipologie di nanotubi al carbonio: nanotubi Alfa, di produzione giapponese, e nanotubi FCCF189, prodotti presso il Dipartimento di Fisica del Politecnico di Torino. Obiettivo del presente lavoro è la valutazione dell’efficacia di un rinforzo con nanotubi in carbonio a parete multipla di composti cementizi autocompattanti, sia ai fini della resistenza che della duttilità. In particolare, vengono qui esaminati i risultati relativi alle prove di compressione. Inoltre, al fine di valutare la capacità di dissipare energia dei CNTSCC, è stata calcolata l’area sottesa dalla curva tensione-deformazione.

PAROLE CHIAVE. Cement; Concrete; Composite; Fracture energy; Nanotube.

INTRODUZIONE

L’industria delle costruzioni, in particolare quella della prefabbricazione, spesso si trova ad affrontare problemi relativi alla realizzazione di elementi strutturali in calcestruzzo di particolare complessità geometrica; complessità che rende difficoltosa la posa dell’armatura metallica, traducendosi in una dilatazione dei tempi e dei relativi costi di costruzione. Inoltre, l’utilizzo di alte percentuali di armatura, utilizzo spesso giustificato dalla necessità di resistere ad azioni esterne particolarmente severe (ad esempio i sismi), crea difficoltà nella realizzazione in opera. In virtù di tali problematiche negli ultimi anni si è diffuso l’uso di calcestruzzi autocompattanti (SCC). Il calcestruzzo autocompattante (SCC) può definirsi come un calcestruzzo in grado di essere gettato all’interno di una cassaforma di cui riesce ad occupare gli angoli più remoti e di difficile accesso, senza l’ausilio di forze esterne come la vibrazione o la compattazione, ma facendo affidamento esclusivamente al peso proprio. L’uso dell’SCC consente di superare le difficoltà connesse con la complessità geometrica delle strutture e i problemi originati da sezioni ad alta percentuale di armatura. L’aggiunta, poi, di fibre di rinforzo (soprattutto in acciaio SFRC)[1], in parziale o totale sostituzione dell’armatura metallica tradizionale (barre o reti elettrosaldate), consente di ottenere calcestruzzi ad alta resistenza adatti per la realizzazione di strutture



sogette a carichi particolarmente gravosi. Fino ad oggi, l'impiego di calcestruzzi fibrorinforzati è stato circoscritto alla realizzazione di strutture di sotterraneo (tunnel, gallerie), pavimentazioni industriali, prefabbricazione, piastre di fondazione e, in generale, opere di un certo impegno strutturale, ove gli evidenti vantaggi economici e tecnici ne giustificavano ampiamente l'uso. Viene tuttavia da chiedersi, anche in virtù dei recenti eventi sismici che hanno colpito l'Italia, se un nuovo campo di applicazione potrebbe aprirsi, e se questi potrebbero rappresentare una valida risposta alla crescente richiesta di maggior sicurezza sismica.

Nell'ambito delle nanotecnologie i nanotubi di carbonio (CNT) sono oggetto di una delle più importanti aree di ricerca. Le loro proprietà e potenzialità, uniche per applicazioni di valore commerciale che variano dall'elettronica al controllo dei processi chimici, hanno significato un'enorme sforzo nello studio dei nanotubi negli ultimi cinque anni. Malgrado questo alto livello di ricerca, scarsa attenzione è stata rivolta ad una loro potenziale applicazione nell'industria delle costruzioni. I nanotubi in carbonio hanno proprietà meccaniche uniche tali da renderli dei materiali da rinforzo quasi ideali. Basti pensare che i CNT a parete singola hanno un modulo elastico di circa 1 TPa, producono resistenze misurate fra 20 e 60 GPa, e tensioni elastiche maggiori del 10%. Inoltre, i CNT hanno sempre un alto rapporto di aspetto con valori pari o maggiori di 1000:1. Estrema resistenza e notevole tenacità, unite ad un alto rapporto di aspetto, fanno dei CNT degli eccellenti materiali di rinforzo. Queste allettanti proprietà hanno richiamato l'attenzione della ricerca sui compositi CNT; ricerca volta in particolare ad indagare il comportamento dei materiali a matrice polimerica, metallica e ceramica. Una nuova frontiera è rappresentata invece dai sistemi compositi CNT-cemento [2,3]. I primi risultati che hanno riguardato le macrostrutture di tali sistemi, sembrano promettere un eventuale sviluppo dei compositi nanotubi/cemento. Tali compositi esaminati al microscopio elettronico hanno mostrato fenomeni di cucitura (*bridging*) sulle fessure, di *pull-out* e di aderenza fra CNT e matrice cementizia; tutti meccanismi di rinforzo che producono microdurezze dei provini più alte nei primi stadi di idratazione, se confrontate con provini senza CNT, e che si traducono nella realizzazione di calcestruzzi più tenaci e resistenti. Un traguardo nello sviluppo dell'industria delle costruzioni collegato alle nanotecnologie è la produzione di calcestruzzi più forti e resistenti. I compositi CNT-cemento sembrano aprire nuovi orizzonti di successo per le aree di ricerca strutturale. L'obiettivo è quello di avvalersi delle nanotecnologie al fine di produrre calcestruzzi innovativi, adatti per applicazioni di notevole impegno strutturale.

Un calcestruzzo autocompattante rinforzato con nanotubi al carbonio a parete multipla (CNTSCC), unisce ai vantaggi dell'SCC quelli derivanti dall'aggiunta di fibre ad una matrice cementizia, configurandosi come materiale ad alte prestazioni. In particolare, il maggior vantaggio derivante dall'aggiunta di fibre ad un calcestruzzo è rappresentato dalla capacità di dissipare energia durante la fessurazione. L'aggiunta di CNT ad una matrice in calcestruzzo autocompattante potrebbe ridurre, se non addirittura eliminare, l'armatura tradizionale, consentendo al tempo stesso di ottenere calcestruzzi ad alta resistenza. Di particolare interesse è lo studio del suo comportamento *post-cracking*, ovvero dopo che si è innescata la fessurazione.

MATERIALS, MIX DESIGN, TEST PROCEDURE

Sulla base di queste premesse, è stato avviato un programma di ricerca sperimentale volto ad indagare il comportamento meccanico dei compositi in CNT a matrice cementizia. Presso il laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Torino sono stati realizzati una serie di provini in calcestruzzo (con e senza additivi) rinforzati con due diverse tipologie di Nanotubi al carbonio a parete multipla (*multi wall carbon nanotubes*, MWCNTs): nanotubi MWCNT FCCF 189, all'uopo prodotti presso il dipartimento di Fisica del Politecnico, e nanotubi MWCNT ALFA di produzione Giapponese. Entrambe le tipologie di nanotubi presentavano un diametro e una lunghezza medi compresi tra 40-80 nm e 200-1000 μm , rispettivamente. Nella preparazione delle miscele si sono utilizzati due differenti rapporti acqua/cemento ($A/C = 0.4$; $A/C = 0.5$) in funzione della presenza o meno degli additivi (fluidificante *Dynamon SP1* e viscosizzante *Viscofluid SCC/10*). I provini di dimensioni 40 x 40 x 160 mm, prodotti nel numero di tre per ciascuna miscela e sulla base delle indicazioni riportate nella norma UNI-EN 196-1 [4], presentavano la composizione e le caratteristiche riportate nella Tab. 1.

Conclusi i getti, i campioni sono stati mantenuti per 24 ore in camera igrometrica a 20°C e umidità relativa >90%. I provini confezionati sono stati disarmati alle 24 ore. La stagionatura è avvenuta in vasca con umidità relativa del 100% e temperatura 20° C per 1,7 e 28 giorni.

Gli elementi prismatici (uno per ogni tipologia) sono stati sottoposti a prove di flessione su tre punti a 1, a 7 e a 28 giorni di stagionatura, rispettivamente. Si è quindi passati a testare i 2 frammenti, ottenuti dalla prova precedente, a compressione. Tali prove sono state condotte su pressa tipo "MTS" a controllo programmato. La velocità di pre-carico è stata impostata su 5 mm/min, mentre quella di prova su 3 mm/min; contemporaneamente si è registrata la resistenza di



carico offerta dal campione. Nel presente lavoro verranno esaminati in particolare i risultati derivanti dalle prove di compressione.

Per quanto riguarda la prassi seguita nel confezionamento delle diverse tipologie di provini, in base all'aspetto che il composto mostrava di volta in volta, si è deciso di adottare diverse modalità. Nel caso dei campioni contenenti nanotubi FCCF 189 (con e senza additivi), questi sono stati dispersi nella miscela di acqua e cemento prima dell'aggiunta dell'inerte e, se il caso, degli additivi. Nel caso invece dei campioni contenenti nanotubi ALFA, quelli privi di additivi sono stati dispersi direttamente nell'acqua e si è poi proceduto all'aggiunta del cemento e della sabbia, quelli con additivi invece sono stati miscelati a secco prima dell'aggiunta dell'acqua, del cemento e dell'inerte. Al fine di testare le caratteristiche meccaniche della matrice del composito, sono stati confezionati dei provini di confronto in calcestruzzo semplice con e senza additivi. Dal momento che l'aggiunta degli additivi genera una matrice in calcestruzzo autocompattante (SCC), solo i campioni privi di additivi sono stati compattati mediante vibratura delle casseforme.

Provino	Cemento (g)	Acqua/cemento	Sabbia (g)	Superfluidificante Dynamon SP1 (% del peso cemento)	Viscosizzante Viscofluid SCC/10 (% del peso cemento)	Nanotubi (% del peso cemento)	
						FCCF189	ALFA
1. CNTSCC-FCCF	450 g	0.4 (180 g)	1350 g	1.1 %	0,5%	0,5%	-
2. CNTconcrete-FCCF	450 g	0.5 (225 g)	1350 g	-	-	0,5%	-
3. CNTconcrete-ALFA	450 g	0.5 (225 g)	1350 g	-	-	-	0,5%
4. CNTSCC-ALFA	450 g	0.4 (180 g)	1350 g	1.1 %	0,5%	-	0,5%
5. SCC	450 g	0.4 (180 g)	1350 g	1.1 %	0,5%	-	-
6. Plain Concrete	450 g	0.5 (225 g)	1350 g	-	-	-	-

Tabella 1

CNTSELFCOMPACTING CONCRETE MECHANICAL PROPERTIES

Compression tests

Le prove di compressione a 1, 7 e 28 giorni di stagionatura sono state condotte mediante pressa MTS sui frammenti (40 x 40 x 40mm, due per ciascun provino) derivanti dalla prova di flessione su tre punti. La resistenza cubica R_c e quella cilindrica f_c sono legate tra di loro dalla relazione $f_c / R_c = 0.83$. Dalle prove di compressione occorre valutare la resistenza caratteristica (R_{ck} o f_{ck}) del frattile 5%, cioè un valore della resistenza che viene superato nel 95% dei casi. Dai valori di R_{ck} (o f_{ck}) si definisce la classe del composito. Sono stati calcolati i valori medi delle resistenza cubica, R_c , e cilindrica, f_c , a 28 giorni di stagionatura e il relativo scarto quadratico medio di ciascuna tipologia di miscela. Utilizzando tali valori è stato possibile stimare i valori caratteristici R_{ck} ed f_{ck} . I due frammenti cubici relativi a ciascun provino sono di seguito indicati con le sigle sx ed dx . Le miscele (testate a 28 giorni) con additivi contenenti Nanotubi ALFA, ovvero i CNTselfcompactingconcrete, sono quelle che mostrano il migliore comportamento meccanico raggiungendo valori medi di resistenza a compressione pari a 67.77 N/mm². Nel caso dei provini con Nanotubi Alfa si ha un incremento di resistenza pari a circa il 90% rispetto agli stessi a 7 giorni di stagionatura (35.34 N/mm²), mentre nel caso dei CNTSCC con nanotubi FCCF 189 tale percentuale sfiora il 30%.

Il grafico di Fig. 1 confronta i valori medi delle tensioni di compressione σ_f relative a ciascuna tipologia testata a 1, 7 e 28 giorni di stagionatura.

Per ciascuna tipologia di miscela, sono state tracciate le curve tensione deformazione, $\sigma - \epsilon$. Tali curve sono state ricavate dalle curve carico-spostamento dividendo il carico per l'area iniziale della sezione trasversale e lo spostamento per l'iniziale altezza del provino.

Le curve sperimentali dimostrano che a 28 giorni di stagionatura l'aggiunta di nanotubi alla matrice in SCC influisce positivamente sulla resistenza massima a compressione del composito. In particolare il composto CNTSCC rinforzato con nanotubi ALFA (quelli di produzione Giapponese) mostra un incremento medio compreso fra il 20 e il 25% rispetto alle miscele in calcestruzzo semplice e in SCC, rispettivamente. Invece, la sola aggiunta di Nanotubi alla matrice in calcestruzzo semplice (provini CNT-ALFA) sembra non migliorare significativamente le prestazioni meccaniche a



compressione del composto, eccezion fatta per i provini CNT-FCCF 189 che mostrano a 28 giorni un valore della σ_c pari a 60.54 N/mm².

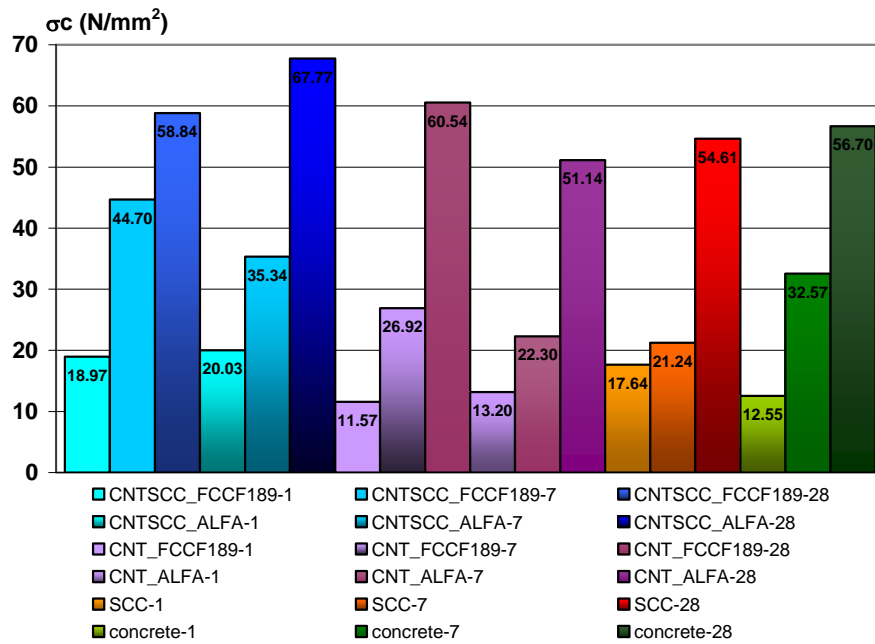


Figura 1: Confronto resistenza a compressione a 1, 7 e 28 giorni di stagionatura

Osservando le curve $\sigma-\epsilon$ si nota che anche a 1 e 7 giorni di stagionatura (Fig. 2-5), i provini CNTSCC sono quelli che raggiungono i valori massimi della tensione σ_c di compressione. Inoltre, in particolare rispetto ai CNTSCC, si osserva che fra 1, 7 e 28 giorni di stagionatura aumenta la pendenza del tratto post-picco della curva $\sigma-\epsilon$: il comportamento *post-cracking* dei CNTSCC manifesta fenomeni di transizione duttile-fragile all'aumentare dei giorni di stagionatura (da softening a fragile).

Nelle Fig. 2-5 è stata valutata per ciascuna tipologia di miscela confezionata, l'influenza del tempo di stagionatura sulla resistenza meccanica a compressione. L'aspetto che più risalta da tali grafici è l'aumento esponenziale del valore massimo della resistenza media a compressione σ_c all'aumentare dei giorni di stagionatura, cosa, questa, che (analogamente al calcestruzzo semplice) si traduce in un comportamento più fragile dei CNTSCC dopo il carico di picco.

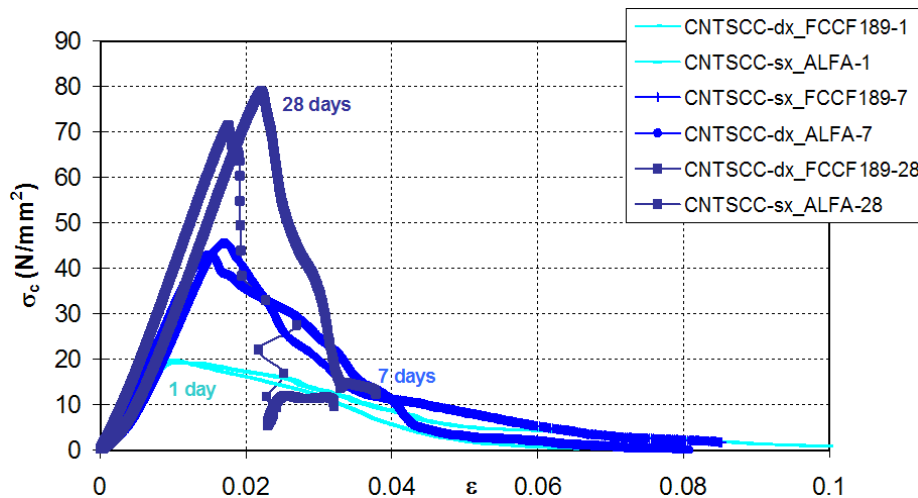


Figura 2: Confronto curve $\sigma-\epsilon$ dei provini CNTSCC (miscela 1 e 4) in funzione del tempo di stagionatura

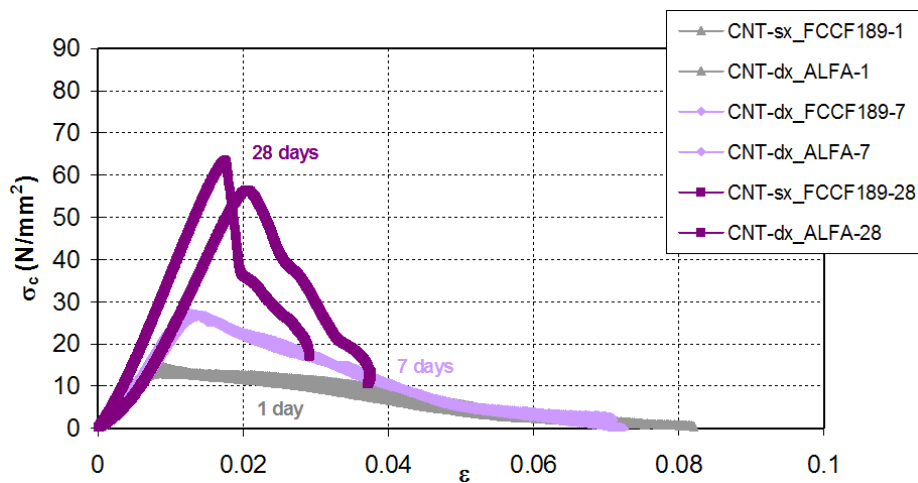


Figura 3: Confronto curve σ - ϵ dei provini CNTconcrete (miscele 2 e 3) in funzione del tempo di stagionatura.

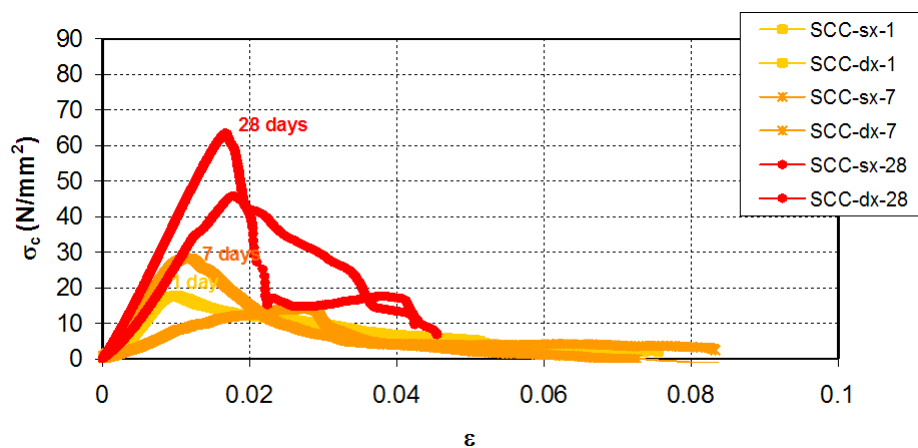


Figura 4: Confronto curve σ - ϵ dei provini SCC (miscela 5) in funzione del tempo di stagionatura.

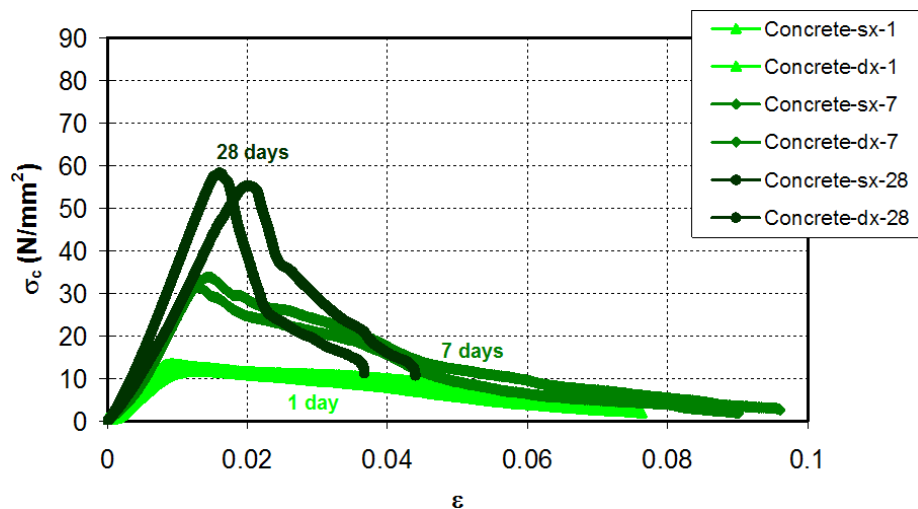


Figura 5: Confronto curve σ - ϵ dei provini in calcestruzzo semplice (miscela 6) in funzione del tempo di stagionatura.



In particolare i provini in CNTSCC (Fig. 2) rinforzati con nanotubi FCCF189 esibiscono a soli 7 giorni di stagionatura un valore della σ_c media più che raddoppiato (135%) rispetto agli omologhi testati ad 1 giorno (44.70 MPa contro 18.97 MPa), mentre fra 7 e 28 giorni il tasso di incremento medio si riduce e passa al 30% (44.70 MPa contro 58.84 MPa). I provini CNTSCC con nanotubi ALFA mostrano un trend analogo anche se invertito: fra 1 e 7 giorni la percentuale d'incremento corrisponde al 75% (20 MPa contro 35.34 MPa); viceversa fra 7 e 28 giorni tale percentuale aumenta ulteriormente e raggiunge il 90% (35.34 MPa contro 67.77 MPa). Inoltre, per entrambe le tipologie di CNTSCC, si nota nella fase post-picco la transizione da un comportamento softening (a 1 e 7 giorni) ad un comportamento più fragile (a 28 giorni), testimoniato dalla maggiore pendenza del ramo discendente della curva $\sigma - \varepsilon$.

Per la miscela in SCC (Fig. 4), che rappresenta di fatto la matrice dei CNTSCC, la tensione media di compressione σ_c valutata a 28 giorni è più di 2.5 volte quella calcolata a 7 giorni (54.6 MPa contro 21.24 MPa), mentre fra 1 e 7 giorni il tasso di incremento si riduce e passa al 20% (17.64 MPa contro 21.24 MPa). È interessante notare che mentre per gli SCC il tasso d'incremento della resistenza si sviluppa all'aumentare dei giorni di stagionatura, per i CNTSCC tale incremento è massimo nei primi giorni di stagionatura. Quindi l'aggiunta di CNT alla matrice in SCC migliora le prestazioni meccaniche del composto in particolare nelle prime di idratazione del cemento: l'evoluzione della resistenza a compressione in funzione del tempo di stagionatura indica che oltre i 28 giorni l'incremento della σ_c media è marginale.

I campioni CNTconcrete-FCCF189 (Fig. 3) mostrano fra 1,7 e 28 giorni un aumento percentuale della resistenza media a compressione pressappoco costante e pari al 130% (11.56 MPa-26.90 MPa-60.53 MPa), mentre gli stessi con nanotubi ALFA presentano un tasso d'incremento maggiore fra 7 e 28 rispetto a quello fra 1 e 7 (130% contro 70%).

In Fig. 5 sono state riportate le curve relative alla miscela in calcestruzzo semplice.

Per identificare la classe di resistenza delle diverse miscele testate si è fatto riferimento sia alla "Linee guida sul calcestruzzo strutturale" [5] che classificano il calcestruzzo in base alla resistenza meccanica a compressione testata a 28 giorni di stagionatura, sia alla Rilem TC 162-TDF [6].

Il calcestruzzo semplice costituente la matrice di ciascuna tipologia prodotta si configura come un calcestruzzo ad Alte prestazioni (C50/60). Quando la matrice cementizia viene addizionata con il superfluidificante e viscosizzante il calcestruzzo diviene ordinario (C35/45), seppur autocompattante (SCC). L'aggiunta di nanotubi (provini 2.3 e 3.3) alla matrice in calcestruzzo incrementa le resistenze caratteristiche rendendo il composto un calcestruzzo ad Alte prestazioni. Per tali tipologie di provini (2.3, 3.3 e 4.3) le resistenze meccaniche calcolate vanno oltre la classe di resistenza proposta dalla Rilem TC 162-TDF. Per quanto riguarda i provini con Nanotubi e additivi (CNTSCC, provini 1.3 e 4.3) le classi di resistenza indicate dalle Linee Guida e dalle raccomandazioni Rilem TC 162-TDF coincidono: in entrambe i casi i provini possono classificarsi tra le classi C40/50-C45/55 (provino 1.3) e C50/60-C55/67 (provino 4.3).

Nella Tabella 2 in riferimento ai provini testati a 28 giorni è stato fatto un confronto fra resistenze meccaniche e modulo elastico, calcolati secondo le diverse normative. In particolare sono indicate la resistenza media a compressione f_{cm} , la resistenza media a flessione $f_{cm,fl}$, entrambe derivanti da prove UNI EN 196-2005 [4], la resistenza caratteristica a trazione per flessione $f_{ctk,fl}$, valutata secondo la Rilem TC 162 TDF, e il valore medio del modulo di elasticità secante E_{cm} . Quest'ultimo è stato calcolato secondo le Linee guida sui calcestruzzi strutturali e la Rilem TC162-TDF. Il valore riportato nell'ultima colonna della Tab. 2 rappresenta il valore del modulo elastico previsto per gli FRC dalla Rilem TC162-TDF in base alla classe di resistenza di appartenenza.

La Tab. 2 mostra che la Rilem fornisce un valore del modulo elastico medio superiore a quello ottenuto applicando le Linee guida, ma comunque inferiore a quello teorico prescritto dalla stessa Rilem per ciascuna classe di appartenenza, ad eccezione del CNTSCC ALFA. Confrontando tali valori con quelli calcolati a 1 e 7 giorni, si osserva che i CNTSCC (provini 1 e 4) dopo soli 7 giorni di stagionatura mostrano resistenze caratteristiche a compressione paragonabili a quelle relative ad un calcestruzzo ordinario a 28 giorni di stagionatura (C35/45 e C25/30).

Interessanti sono anche i valori relativi al modulo elastico secante calcolato a 1 e 7 giorni. Nella Tab. 3 è stato fatto un confronto fra modulo elastico E_{cm} valutato a 1, 7 e 28 giorni.

Dalla Tab. 3 si evince che il modulo di elasticità medio E_{cm} dei provini 1, 4 e 5 (provini CNTSCC e relativa matrice SCC) raggiunge i valori maggiori già dopo 1 giorno, per poi aumentare ulteriormente all'aumentare dei giorni di stagionatura. Inoltre, il valore calcolato utilizzando le raccomandazioni Rilem TC 162-TDF supera di circa il 15% quello valutato secondo le Linee guida sui calcestruzzi strutturali.

Il grafico di Fig. 6 confronta il modulo di elasticità secante E_{cm} , calcolato secondo la Rilem TC162-TDF, al variare del tempo di stagionatura (1, 7 e 28 giorni). La Fig. 7 indica la resistenza media a compressione di ciascuna tipologia testata in funzione del tempo di stagionatura. Analizzando i grafici è interessante notare che ad un solo giorno di stagionatura la resistenza f_{cm} dei campioni CNTSCC è pari a circa 17 MPa, mentre il modulo elastico E_{cm} raggiunge i 24.5 GPa (valore paragonabile a quello relativo ad un SCC rinforzato con fibre d'acciaio, SCSFRC [1]). Tali proprietà aumentano



all'aumentare dei tempi di stagionatura, raggiungendo 62 MPa e 35 GPa, rispettivamente per f_{cm} ed E_{cm} a 28 giorni (come per un SCSFRC). Dopo solo 1 giorno E_{cm} corrisponde già al 69% del valore di E_{cm} a 28 giorni. A 7 giorni di stagionatura f_{cm} ed E_{cm} , corrispondono al 59% e 89% dei corrispondenti valori a 28 giorni. Si può osservare che nei primi giorni E_{cm} subisce un incremento più evidente rispetto ad f_{cm} . L'incremento della resistenza media a compressione, come per un calcestruzzo ordinario, si traduce in un comportamento più fragile dopo il carico di picco del composto nanorinforzato (Fig. 5).

Provino	Resistenza media a compressione f_{cm}	Resistenza media a flessione $f_{cm,fl}$	Resistenza caratteristica a trazione per flessione $f_{ctk,fl}$	Modulo secante medio E_{cm}	Modulo secante medio E_{cm}	
	UNI EN 196-2005 (N/mm ²)	UNI EN 196-2005 (N/mm ²)	TC 162-TDF (N/mm ²)	“Linee guida cls strutturali” (kN/mm ²)	TC 162-TDF (kN/mm ²)	
					calcolato	teorico
1.3) CNTSCC-FCCF189	59.80	10.08	7.05	32.46	37.15	35/36
2.3) CNTconcrete-FCCF189	56.64	8.67	6.07	31.87	36.48	+37
3.3) CNTconcrete-ALFA	51.57	7.27	5.09	30.90	35.36	+37
4.3) CNTSCC-ALFA	63.39	8.20	5.74	33.09	37.88	36/37
5.3) SCC	54.33	7.50	5.25	31.44	35.98	-
6.3) Plain concrete	52.71	7.73	5.41	31.12	35.62	-

Tabella 2: Resistenze meccaniche e modulo elastico provini a più 28 giorni.

giorni	E_{cm} “Linee guida cls strutturali” (kN/mm ²)						E_{cm} TC 162-TDF (kN/mm ²)					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	21.56	19.11	19.05	21.18	20.31	18.13	24.68	21.87	21.80	24.25	23.24	20.75
7	27.97	24.81	23.05	27.04	23.19	25.27	32.01	28.39	26.38	30.95	26.55	28.93
28	32.46	31.87	30.89	33.09	31.44	31.12	37.15	36.48	35.36	37.88	35.98	35.62

Tabella 3: Modulo elastico a 1, 7 e 28 giorni.

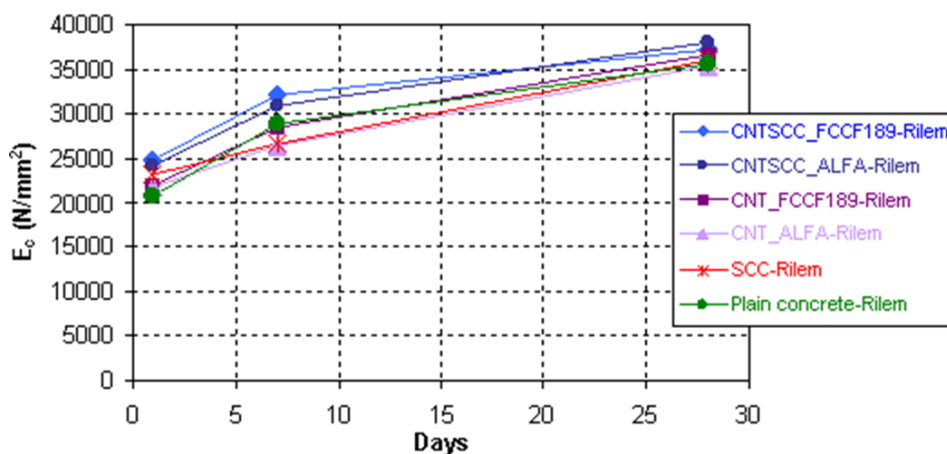


Figura 6: Influenza del tempo di stagionatura sul modulo elastico E_{cm} secante dei campioni CNTSCC (Rilem TC162-TDF)

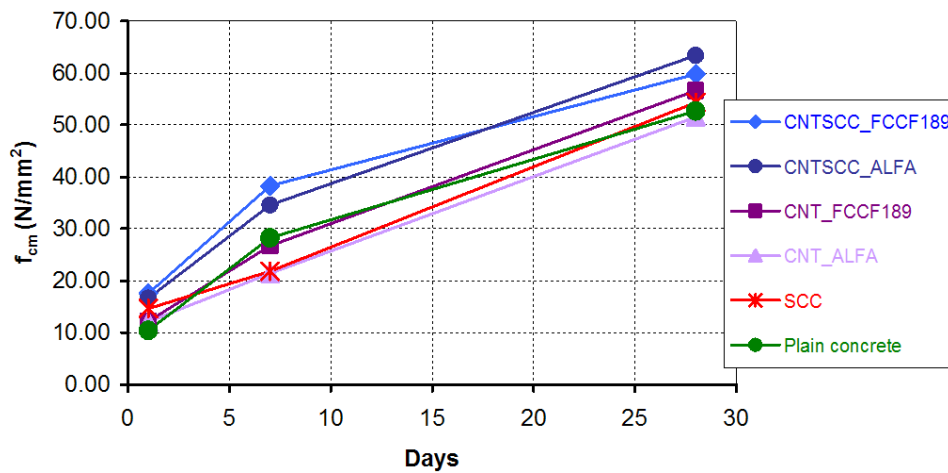


Figura 7: Influenza del tempo di stagionatura sul valore medio della resistenza a compressione f_{cm} dei campioni CNTSCC.

Densità di energia dissipata

La densità di energia dissipata (o duttilità) può essere valutata considerando l'area sottesa dalla curva $P-\delta$ divisa per il volume del provino [7]. Ciò corrisponde a considerare l'area sottesa dalla curva $\sigma-\varepsilon$. La densità di energia dissipata, $S = W/V$, è data dal rapporto fra lavoro esterno W e volume V ; essa rappresenta l'energia dissipata nel volume del provino e ha le dimensioni fisiche di una tensione $[F]/[L]^2$.

Nel presente lavoro è stata calcolata la densità di energia dissipata S , come area sottesa dalla curva tensione-deformazione fino al minimo valore di tensione. Nella Tab. 4 sono riportati i valori medi di tali aree e la tensione media al carico di picco per ciascuna tipologia testata a 1, 7 e 28 giorni.

Provino	Area media $\sigma-\varepsilon$ (N/mm ²)			Tensione media σ_c al carico di picco (N/mm ²)		
	1 giorno	7 giorni	28 giorni	1 giorno	7 giorni	28 giorni
CNTSCC-FCCF189	0.61	1.25	0.62	18.97	44.70	58.84
CNT-FCCF189	0.57	0.79	0.93	11.57	26.92	60.54
CNT-ALFA	0.51	0.83	0.84	13.20	22.30	51.14
CNTSCC-ALFA	0.87	0.93	1.05	20.03	35.34	67.77
SCC	0.55	0.51	1.03	17.64	21.24	54.61
Plain concrete	0.58	1.22	1.06	12.55	32.57	56.70

Tabella 4: Area sottesa dalla curva $\sigma-\varepsilon$ e relative tensione massima a 1, 7 e 28 giorni.

Il grafico di Fig. 8 mostra l'andamento dell'energia dissipata media, S , in funzione dei giorni di stagionatura. Ad un giorno di stagionatura (prima colonna di ciascuna terna), le miscele CNTSCC-ALFA sono quelle che presentano il più alto valore di S : tale valore supera del 50% quello del calcestruzzo semplice (0.87 contro 0.58 N/mm²), del 60% quello relativo all'SCC e fra il 50 e il 70% quelli del CNTconcrete. A 7 giorni di stagionatura l'area S dei CNTSCC-FCCF189 è quella con il valore più alto (1.25 N/mm²) seguita, nell'ordine, da quella del calcestruzzo semplice (1.22 N/mm²), del CNTSCC-ALFA (0.93 N/mm²), del CNTconcrete sia ALFA che FCCF189 (0.83 e 0.79 N/mm²) e dell'SCC (0.51 N/mm²). In questa fase di maturazione il CNTSCC-FCCF189, pur manifestando un incremento di S pari a più del doppio rispetto all'omologo a 7 giorni, presenta comunque un tasso di crescita leggermente inferiore a quello del calcestruzzo semplice, la cui area sottesa dalla curva $\sigma-\varepsilon$ aumenta di circa il 110%. Fra 1 e 7 giorni di stagionatura per la matrice in SCC si verifica, invece, un decremento di S (0.55 contro 0.51 N/mm²). A 28 giorni i valori relativi alle miscele in CNTSCC rinforzate con le due diverse tipologie di nanotubi presentano un comportamento del tutto differente: mentre quelle con nanotubi ALFA mostrano un, seppur piccolo, incremento di S (15%), quelle con nanotubi FCCF189 manifestano una diminuzione di S



pari a circa la metà del valore a 7 giorni. A 28 giorni le prestazioni dei CNTconcrete (sia ALFA che FCCF189) e dell'SCC aumentano, mentre diminuiscono quelle del calcestruzzo semplice. Ciò vuol dire che mentre il calcestruzzo semplice mostra una capacità di dissipare energia che tende a stabilizzarsi se non addirittura a diminuire al passare dei giorni di stagionatura, il CNTSCC-ALFA manifesta capacità dissipative che crescono nel tempo, raggiungendo i valori massimi al termine dei 28 giorni in concomitanza col raggiungimento dei valori massimi della tensione al carico di picco. Per tale tipologia, all'aumentare dei giorni di stagionatura, si verifica un incremento sia della capacità resistiva sia della capacità di dissipare energia (Fig. 9 e 10).

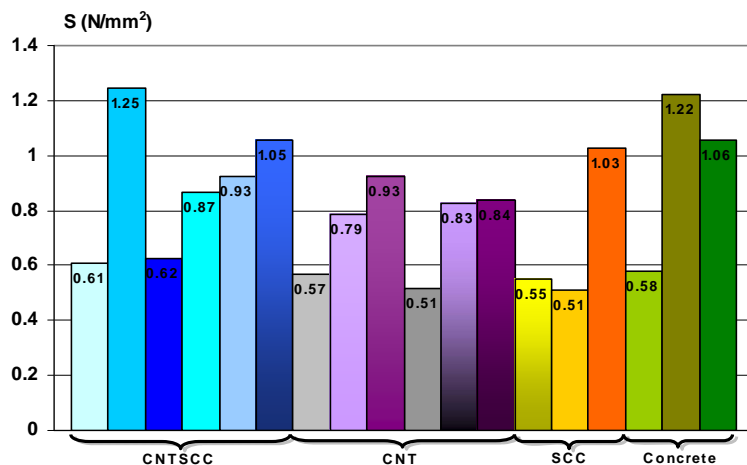


Figura 8: Valori calcolati della densità di energia dissipata, S .

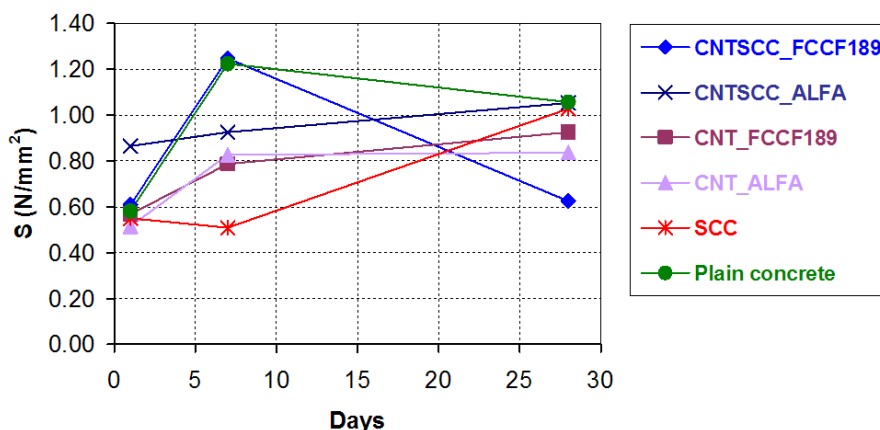


Figura 9: Dissipated energy density media in funzione dei giorni di stagionatura.

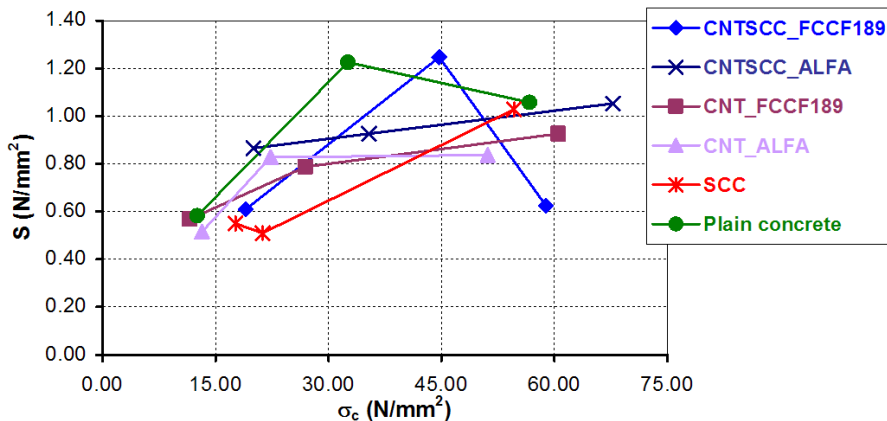


Figura 10: Dissipated Energy density media in funzione della tensione media al carico di picco.



CONCLUSIONI

Nel presente lavoro è stato indagato il comportamento meccanico a compressione di una nuova tipologia di calcestruzzo autocompattante rinforzato con nanotubi al carbonio a parete multipla. Malgrado la bassa percentuale di nanotubi impiegati (0.5% del peso del cemento), i risultati appaiono promettenti. Lo studio di tale materiale e delle sue possibili applicazioni è in fase di sviluppo. Sono in corso di realizzazione provini in calcestruzzo con quantitativi molto maggiori di nanotubi. E' comunque da evidenziare una certa variabilità nella risposta sperimentale del calcestruzzo nanorinforzato (CNTSCC), dovuta in parte al tipo di nanotubi utilizzati e in parte alla disposizione casuale degli stessi e quindi ad una intrinseca eterogeneità del composto, anche a parità di componenti la miscela.

BIBLIOGRAFIA

- [1] J.A.O. Barros, E.B. Pereira, A.F. Ribeiro, J.A.B. Antunes, Workshop of 6th International RILEM Symposium on fibre reinforced concrete - BEFIB (2004).
- [2] F. Canepa, G. Ferro, J.M. Tulliani, V. Cauda, Atti del Congresso IGF19 Milano, (2007).
- [3] S. Musso, J.-M. Tulliani, G. Ferro, A. Tagliaferro, Composite Science and technology, (2009) in stampa.
- [4] UNI EN 196-1: "Metodi di prova dei cementi. Parte 1: Determinazione delle resistenze meccaniche" (2005)
- [5] Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici Servizio tecnico centrale, "Linee guida sul calcestruzzo strutturale".
- [6] RILEM TC 162-TDF, Materials and Structures, 36(262) (2003) 560.
- [7] G. Ferro, Engineering Fracture Mechanics, 73(11) (2006) 1510.