

## WP14: Contributi normativi relativi a Materiali Strutturali Innovativi per la Sostenibilità delle Costruzioni

Coordinatore: Prof. L. Feo - Altri componenti: Proff. F. Ascione, R. Penna – Ingg. A. Lambiase, G. Lovisi  
Dipartimento di Ingegneria Civile – Laboratorio Strutture (STRENGTH) - Università degli Studi di Salerno

### Task 14.1: MATERIALI COMPOSITI A MATRICE INORGANICA PER INTERVENTI SU COSTRUZIONI ESISTENTI

#### OBIETTIVI

Nell'ambito del Task 14.1, la presente Unità di Ricerca (UR) ha avuto come obiettivi lo studio della durabilità di calcestruzzi ad alte prestazioni, HPFRC\_CNF, additivati con fibre di acciaio e nanofibre di carbonio (CNF), nei confronti di cicli di gelo/disgelo e di ambienti aggressivi e l'analisi di alcuni aspetti di efficientamento energetico. Lo studio è stato sia di tipo teorico/numerico, sia di tipo sperimentale.

#### FORMULAZIONE E VALIDAZIONE DI UN MODELLO CRACKED-HINGE

Dal punto di vista teorico/numerico l'UR si è impegnata nella messa a punto e nella validazione di un modello matematico orientato alla previsione del comportamento post-fessurativo di elementi in HPFRC\_CNF soggetti a flessione ed, in particolare, alla valutazione dell'influenza delle nanofibre sul legame costitutivo della matrice e sulla legge bond-slip relativa alle fibre d'acciaio incorporate. Il modello segue un approccio meso-meccanico, combinando una relazione "tensione-apertura della fessura" per la matrice cementizia con leggi generalizzate volte a catturare l'effetto 'ponte' giocato dalle fibre di rinforzo di acciaio. È stata implementata una procedura di identificazione inversa allo scopo di determinare i valori dei parametri del modello che minimizzano la differenza tra le curve forza-spostamento presenti in letteratura e quelle calibrate numericamente.

#### Calibrazione dei parametri dell'energia di frattura su base sperimentale

La dipendenza dell'energia di frattura ( $G_F$ ) rispetto alla percentuale di nanofiller è stata presa in considerazione modificando solo l'apertura di fessura  $w_1$  attraverso l'introduzione di un nuovo parametro  $\alpha$ . La calibrazione del nuovo parametro e i valori dell'energia di frattura sono riportati in Tabella 1; in Figura 1 è rappresentato il comportamento qualitativo a trazione post-fessurativo del calcestruzzo per ciascun contenuto di nanofibre di carbonio.

CONTENUTO DI NANOFIBRE DI CARBONIO	ENERGIA DI FRATTURA	
	$\alpha$ [-]	$G_F$ [N/mm]
0%	1	0,14
0,05%	1,8	0,14
0,01%	1	0,17
0,015%	1,6	0,26
0,2%	0,4	0,27
0,3%	0,85	0,30

Tab. 1. Energia di frattura al variare del contenuto di nanofibre.

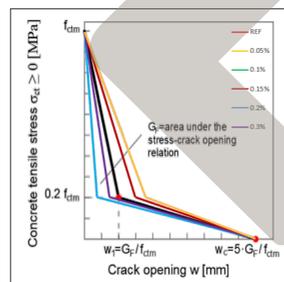


Fig. 1. Rappresentazione qualitativa del legame tensione-apertura di fessura al variare del contenuto di nanofibre.

### Task 14.3: CALCESTRUZZI GREEN E AD ELEVATA DURABILITA'

#### OBIETTIVI

Nell'ambito del Task 14.3, l'UR si è impegnata principalmente nello studio sperimentale volto ad indagare la distribuzione ottimale di nanofiller in matrici cementizie, al fine di fornire delle indicazioni preliminari di tipo progettuale per l'uso di nuovi calcestruzzi additivati soltanto con nanomateriali.

#### ATTIVITA' SPERIMENTALE

La sperimentazione è stata condotta presso il Laboratorio Strutture (STRENGTH) del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università degli Studi di Salerno. Essa ha riguardato il confezionamento di paste di cemento ad alte prestazioni (HPC) addivate con nanotubi di carbonio a parete multipla (MWCNTs) al fine di analizzare gli effetti della dispersione delle nano-aggiunte sul comportamento a compressione e sulla risposta elettrica di questi nanocompositi, per un loro impiego nell'ambito dell'SHM come calcestruzzi autodiagnostici (Self-Sensing).

#### Preparazione delle miscele

Fissato il rapporto acqua/cemento (a/c) pari a 0,15, è stata fatta variare la frazione in peso dei MWCNTs nel range di valori 0,0%-0,3%, con un passo di 0,10%, ottenendo quattro differenti miscele. Per ogni percentuale così ottenuta, sono stati colati 9 provini cubici di lato pari a 5 cm. Attesa la natura idrofobica dei nanotubi, per la dispersione dei nanofiller in acqua è stato previsto l'uso di Sodio Dodecil Solfato, SDS, (ad una concentrazione dello 0,2% rispetto al peso del cemento) e la successiva sonicazione. Infine, in ciascun campione sono state preventivamente incorporate quattro reti di rame a maglie quadre (usate come elettrodi) al fine di misurare la resistività elettrica a 28gg di maturazione.

#### Calibrazione dei parametri della legge bond-slip delle fibre di acciaio

Una volta calibrati i (cinque) parametri della legge bond-slip ( $\tau_{el}$ ,  $\tau_R$ ,  $s_{el}$ ,  $s_R$ ,  $s_U$ ) per la miscela priva di nanofiller (Miscela «REF.»), sono state ricalibrate le tensioni di legame ( $\tau_{el}$ ,  $\tau_R$ ) per le seguenti percentuali in peso dei nanofibre: 0,05%, 0,1%, 0,15%, 0,2%, 0,3% (Tabella 2). La rappresentazione qualitativa della legge bond-slip per ciascuna miscela è riportata in Figura 2.

CONTENUTO DI NANOFIBRE DI CARBONIO	LEGGE BOND-SLIP PER LE FIBRE D'ACCIAIO				
	$\tau_{el}$ [MPa]	$\tau_R$ [MPa]	$s_{el}$ [mm]	$s_R$ [mm]	$s_U$ [mm]
0%	10	5	0,8	15	20
0,05%	11	8	0,8	15	20
0,01%	19	10	0,8	15	20
0,015%	22	13	0,8	15	20
0,2%	25	15,5	0,8	15	20
0,3%	30	18	0,8	15	20

Tab. 2. Calibrazione della legge bond-slip delle fibre d'acciaio.

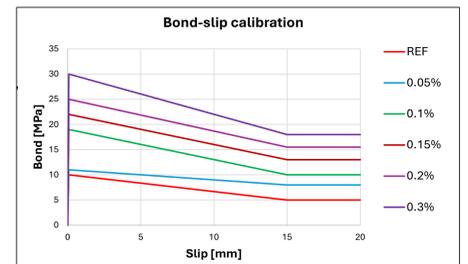


Fig. 2. Rappresentazione qualitativa della legge bond-slip al variare del contenuto di nanofibre.

#### RISULTATI: CONFRONTO NUMERICO-SPERIMENTALE

Dal confronto tra i risultati sperimentali e quelli numerici si evince che, per tutte le miscele esaminate, il ramo elastico delle curve sperimentali (curve nere e grigie) si sovrappone quasi perfettamente al ramo elastico delle curve ottenute numericamente (curve colorate). Alcune lievi differenze sono presenti nella risposta post-fessurativa: si è riscontrato un comportamento di tipo «softening» quando il contenuto di nanofibre è compreso tra 0,0% e 0,05%, ed uno di tipo «hardening» quando il contenuto è superiore a 0,05% (Figura 3).

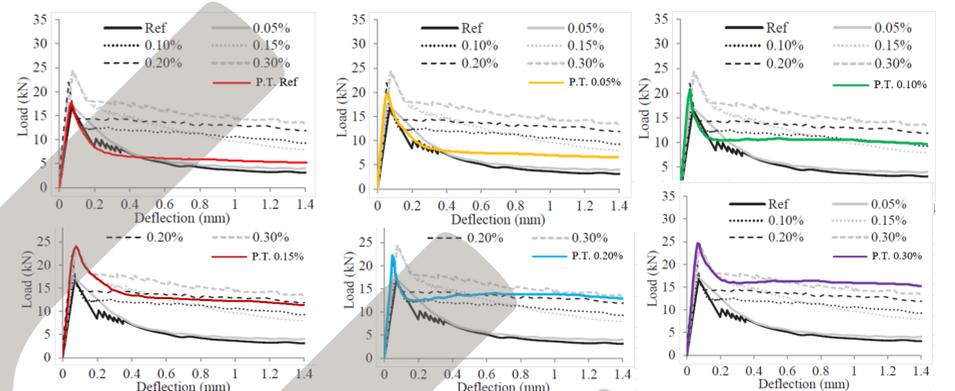


Fig. 3. Confronto tra risultati sperimentali (curve nere e grigie) e numerici (curve colorate) in termini di curve forza-deflessione.

#### RISULTATI SPERIMENTALI

La resistenza a compressione media per ciascuna miscela è riportata in Figura 4. La prova è stata eseguita in conformità con la norma ASTM C109, utilizzando una macchina di prova universale a servocomando, in controllo di forza, con una velocità di carico pari a 1,35 kN/s. La resistenza elettrica è stata acquisita ad una frequenza di 10 kHz mediante un misuratore LCR. In Figura 5 sono riportati i valori medi della resistività per ciascuna miscela (ottenuti utilizzando la II legge di Ohm).

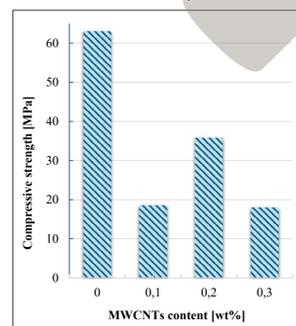


Fig. 4. Resistenza a compressione media al variare del contenuto di MWCNTs.

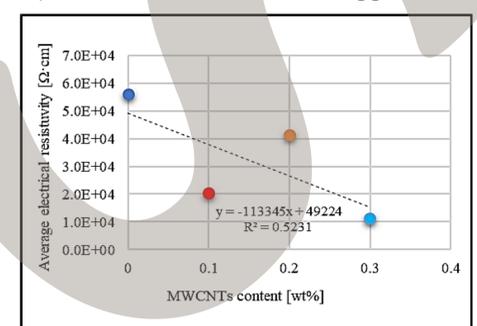


Fig. 5. Resistività elettrica media al variare del contenuto di MWCNTs.

Dal punto di vista elettrico, i primi risultati sperimentali hanno evidenziato che all'aumentare del contenuto di MWCNTs, la conduttività delle miscele aumenta. Tuttavia, i campioni non hanno mostrato alcun miglioramento dal punto di vista meccanico. Le cause possono risiedere in diversi fattori: dispersione non uniforme dei MWCNTs, basso rapporto a/c, e percentuale non ottimale di MWCNTs. Inoltre, al fine di indagare ulteriormente sulla «soglia di percolazione elettrica», che rappresenta il parametro chiave di un calcestruzzo autodiagnostico, sono attualmente in corso altre prove nell'ambito del progetto RELUIS 2024-2026.