

IL PROGETTO EnCoRe: UNA INIZIATIVA SOVRANAZIONALE PER PROMUOVERE IL CONCETTO DI SOSTENIBILITÀ DEL CALCESTRUZZO E DEI MATERIALI CEMENTIZI

ENZO MARTINELLI,
Università di Salerno, Italia
JOAQUIM A.O. BARROS,
Universidade do Minho, Portogallo
GUILLERMO ETSE,
Universidad Nacional de Tucumàn, Argentina
LIBERATO FERRARA,
Politecnico di Milano, Italia
PAULA CECILIA FOLINO,
Universidad de Buenos Aires, Argentina
EDUARDUS A.B. KOENDERS,
*Universidade Federal do Rio de Janeiro
(Brasile) & MicroLAB, TU Delft (Paesi Bassi)*
ROMILDO D. TOLEDO FILHO,
*Universidade Federal do Rio de Janeiro
(Brasile)*

SUMMARY

Environmental issues are getting more and more relevant in several fields of human activities and the building industry is fully concerned by these concerns. Recycled concrete aggregates (RCA) can be produced by existing concrete members resulting by either industrial processes (i.e., precast structures) or demolitions of existing structures as a whole. Moreover, waste resulting from industrial processes other than the building industry (i.e., production of steel, management of glass, powders resulting from other depuration processes) could be efficiently disposed as concrete aggregates or employed as reinforcement for Fiber-Reinforced Concretes (FRC). The use of natural fibres can also result into an environmentally-friendly and cost-effective solution, especially in developing countries, because of the local availability of raw materials. In order to promote the use of concretes with recycled and/or natural constituents as construction materials, the compatibility between the non conventional constituents and the concrete matrix have to be deeply investigated and correlated to the resulting mechanical and durability properties of the composite. This is the main goal of the EnCoRe Project (www.encore-fp7.unisa.it), a EU-funded initiative, whose activities and main findings will be summarized in this paper.

1. INTRODUZIONE

L'industria delle costruzioni sta prestando sempre maggiore attenzione alle problematiche ambientali, focalizzando l'interesse della ricerca applicata sulla possibilità di utilizzare, quali componenti "riciclati" per il calcestruzzo, materiali riciclati e sotto-prodotti di processi industriali.

Gli aggregati da calcestruzzo riciclato, ad esempio, possono essere ottenuti da elementi strutturali prefabbricati di edifici dismessi o dalla demolizione di intere costruzioni. In quest'ultimo caso, il residuo non è costituito solo da calcestruzzo ma, verosimilmente, contiene anche materiali di altro genere, quali acciaio d'armatura, laterizio, legno, plastica etc. Oltre a questi, anche i residui di altri processi industriali possono essere utilizzati quali costituenti riciclati nel calcestruzzo. Particolari residui, in plastica o metallo, possono essere inoltre opportunamente trattati per essere utilizzati quale rinforzo fibroso disperso in calcestruzzi e compositi cementizi fibrorinforzati. In quest'ultimo caso, prima ancora delle prestazioni meccaniche del materiale ottenuto, vanno attentamente studiate la compatibilità chimico-fisica fra il rinforzo e la matrice cementizia e la durabilità del composito.

Una ulteriore possibilità, di elevato valore ambientale oltre che economico, è stata individuata nell'uso delle fibre naturali come rinforzo disperso nelle matrici cementizie, tali fibre essendo, in genere, sottoprodotti dell'industria agricola ed alimentare, disponibili in grandi quantità ed a costi assai limitati specie in paesi emergenti.

Il progetto **EnCoRe** (*Environmentally friendly solutions for Concrete with Recycled and natural components*, www.encore-fp7.unisa.it), finanziato dall'Unione Europea nell'ambito del 7° Programma Quadro per la Ricerca e l'Innovazione è appunto rivolto alla caratterizzazione fisico-meccanica di calcestruzzi e compositi cementizi prodotti con aggregati e/o fibre riciclate e naturali.

Nell'ambito del progetto sono stati perseguiti tre fondamentali obiettivi:

- caratterizzazione delle proprietà fisico-meccaniche del calcestruzzo con aggregati riciclati e formulazione di relativi modelli predittivi;
- caratterizzazione delle proprietà fisico-meccaniche di calcestruzzi rinforzati con fibre metalliche provenienti da pneumatici riciclati;
- caratterizzazione delle proprietà fisico-meccaniche di compositi cementizi rinforzati con fibre di origine naturale.

Con riferimento a queste tematiche, il lavoro propone un resoconto delle attività del progetto.

2. IL CONSORZIO

Il progetto EnCoRe è basato sulla collaborazione tra sei istituzioni universitarie appartenenti a paesi europei e latino-americani, nell'ambito di una iniziativa IRSES (International Research Staff-Exchange Scheme) del 7° Programma Quadro per la Ricerca e l'Innovazione finanziato dall'Unione Europea:

- l'Università di Salerno (UniSA) partecipa con il gruppo di ricerca afferente al Laboratorio di Strutture del Dipartimento di Ingegneria Civile (www.diciv.unisa.it);
- la Universidade do Minho (UMinho, PT) partecipa con il gruppo di ricerca sui Materiali Compositi per il Rinforzo Strutturale (<http://www.civil.uminho.pt/composites/>);
- il Politecnico di Milano (PoliMI) partecipa con un gruppo di ricerca sui materiali cementizi avanzati del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (www.dica.polimi.it);
- la Universidad de Buenos Aires (UBA, AR) partecipa con il gruppo di ricerca del Laboratorio di Metodi Numerici nell'Ingegneria (<http://laboratorios.fi.uba.ar/lmni/>);
- la Universidad Nacional de Tucuman (UNT, AR) partecipa con il gruppo di ricerca del Centro di Metodi Numerici e Computazionali per l'Ingegneria (<http://www.facet.unt.edu.ar/>);
- la Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ, BR) partecipa con il gruppo di ricerca del Sustainability Center for Research and Education on Environmental Friendly Materials and Technologies del Laboratorio di Strutture (<http://www.labest.coc.ufrj.br>).

Presso l'Università di Salerno è stato sviluppato un esteso programma sperimentale per la valutazione delle proprietà di calcestruzzi preparati con aggregati riciclati ovvero con fibre provenienti da pneumatici riciclati.

Presso il Politecnico di Milano e la Universidade do Minho sono stati condotti, invece, programmi di ricerca su compositi cementizi fibrorinforzati, con rinforzo fibroso costituito da fibre riciclate o di origine naturale.

I risultati di queste attività sperimentali sono stati, anche grazie alla mobilità finanziata nell'ambito del progetto, condivisi fra i diversi partner, per lo sviluppo della relative attività di modellazione, con innegabili vantaggi in termini di impatto e visibilità sia transnazionale sia nell'ambito delle singole comunità nazionali dei risultati del progetto. In particolare, la collaborazione con la Universidad de Buenos Aires e la Universidad Nacional de Tucuman, ha portato all'interno del progetto due gruppi di ricerca di eccellenza, già collaboranti fra loro, nell'ambito della meccanica computazionale di

materiali quasi fragili. Inoltre, la collaborazione con la Universidade Federal do Rio de Janeiro ha consentito di annoverare fra i partner del progetto uno dei più attivi gruppi di ricerca, a livello mondiale, sull'uso delle fibre naturali nei compositi a matrice cementizia; tale gruppo, in generale, può in ogni caso annoverarsi fra quelli di eccellenza nel campo della sostenibilità dei materiali da costruzione.

3. CALCESTRUZZO CON AGGREGATI RICICLATI

Una parte significativa delle attività di ricerca svolte nell'ambito del progetto EnCoRe si è concentrata sul comportamento meccanico del calcestruzzo confezionato sia con ceneri volanti sia con aggregati riciclati provenienti da demolizioni di strutture e costruzioni esistenti. La possibilità di riutilizzare nella industria delle costruzioni i suddetti materiali è di straordinaria importanza economica ed ambientale, considerati gli elevati costi di smaltimento dei suddetti rifiuti.

Come ben noto, la cenere volante (fly ash – FA) è il residuo in forma di fine polvere allo stato vetroso veicolato dai gas prodotti dalla combustione del carbone nelle centrali termoelettriche. L'utilizzo della cenere volante quale costituente del calcestruzzo comporta un duplice beneficio: da un lato viene ridotto il quantitativo globale dei rifiuti industriali prodotti e dall'altro, ponendosi essa come sostituto del cemento a motivo delle sue proprietà pozzolaniche, viene altresì ridotta la richiesta di cemento Portland, e la sua conseguente produzione, con conseguenti vantaggi in termini di emissioni di CO₂ nell'atmosfera.

Nel corso del progetto si è altresì verificata sperimentalmente l'ipotesi che un utilizzo combinato di ceneri volanti ed aggregati riciclati nel calcestruzzo possa contribuire ad un significativo miglioramento delle proprietà meccaniche del composito, portandole a livelli confrontabili con quelle di un calcestruzzo ordinario confezionato con cemento Portland ed aggregati naturali. A partire da un calcestruzzo ordinario di riferimento, sono state formulate e realizzate dodici miscele, suddivise in tre gruppi.

I tre gruppi si contraddistinguono per la diversa percentuale di cenere volante aggiunta in "sostituzione" del cemento portland. Ciascun gruppo è, quindi, articolato su quattro miscele, caratterizzate da diverse percentuali di sostituzione dell'aggregato naturale con aggregato riciclato. In Figura 1 sono mostrati alcune tipologie di aggregato utilizzate mentre in Tabella 1 è riportato il dettaglio delle composizioni delle miscele studiate.

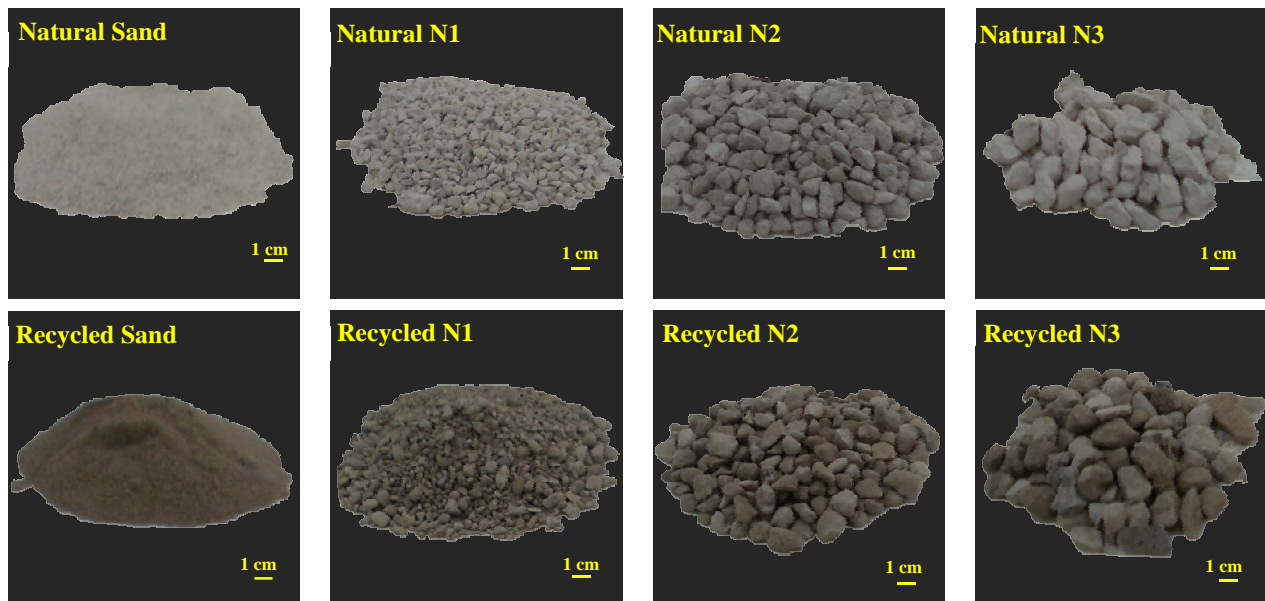


Figura 1. campioni di aggregate naturali ed artificiali utilizzati nella campagna sperimentale da UniSa

Mix	C [kg/m ³]	FA [kg/m ³]	FA/C	RCA [%]	w [kg/m ³]	w _{add} [kg/m ³]	NA [kg/m ³]				RCA [kg/m ³]				w _{tot} /b ₀ ⁺	w _{tot} /b ^{**}
							N3	N2	N1	Sand	N3	N2	N1	Sand		
N	280	0	0	0	150	14.02	505	470	165	830	-	-	-	-	0.59	0.59
LN	250	80	0.32	0	150	14.02	505	470	165	750	-	-	-	-	0.58	0.58
LR30	250	80	0.32	30	150	21.86	-	408	165	750	445	55	-	-	0.61	0.61
LR60	250	80	0.32	60	150	38.16	-	-	-	750	445	415	145	-	0.67	0.67
LR100	250	80	0.32	100	150	109.65	-	-	-	-	445	415	145	660	0.92	0.92
MN	250	220	0.88	0	150	11.28	545	490	170	500	-	-	-	-	0.48	0.57
MR30	250	220	0.88	30	150	17.85	35	490	170	500	450	-	-	-	0.50	0.59
MR60	250	220	0.88	60	150	28.99	-	-	185	500	455	450	-	-	0.53	0.63
MR100	250	220	0.88	100	150	98.84	-	-	-	-	400	375	130	595	0.74	0.88
HN	200	255	1.27	0	150	11.28	545	490	170	500	-	-	-	-	0.53	0.71
HR30	200	255	1.27	30	150	17.85	35	490	170	500	450	-	-	-	0.56	0.74
HR60	200	255	1.27	60	150	28.68	-	-	175	500	455	445	-	-	0.59	0.79
HR100	200	255	1.27	100	150	98.84	-	-	-	-	400	375	130	595	0.82	1.10

Tabella 1. Composizione delle miscele studiate per diversi rapporti di sostituzione del cemento Portland con cenere volante e diverse percentuali di aggregato riciclato in sostituzione dell'aggregato naturale.

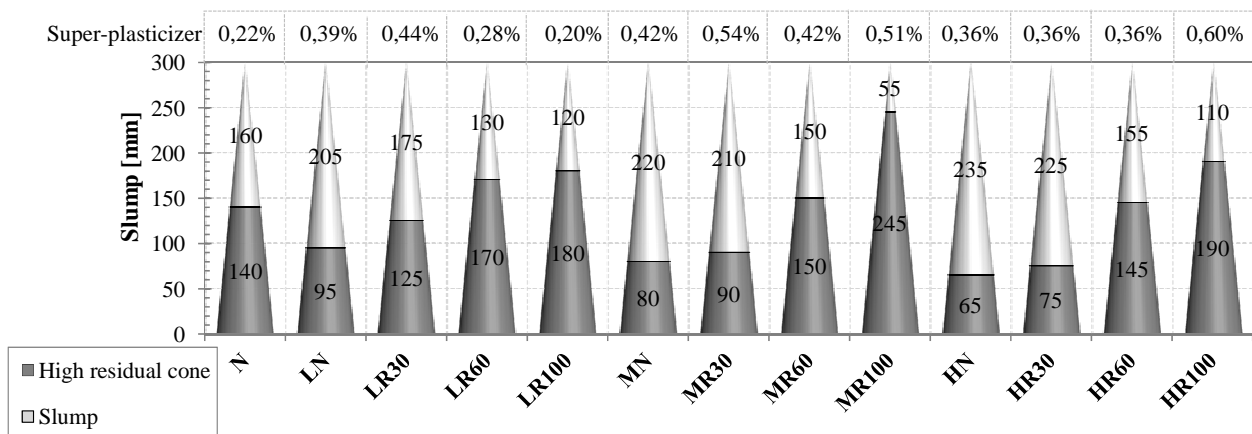


Figura 2: misura della prestazione allo stato fresco (abbassamento al cono) per le 13 miscele studiate

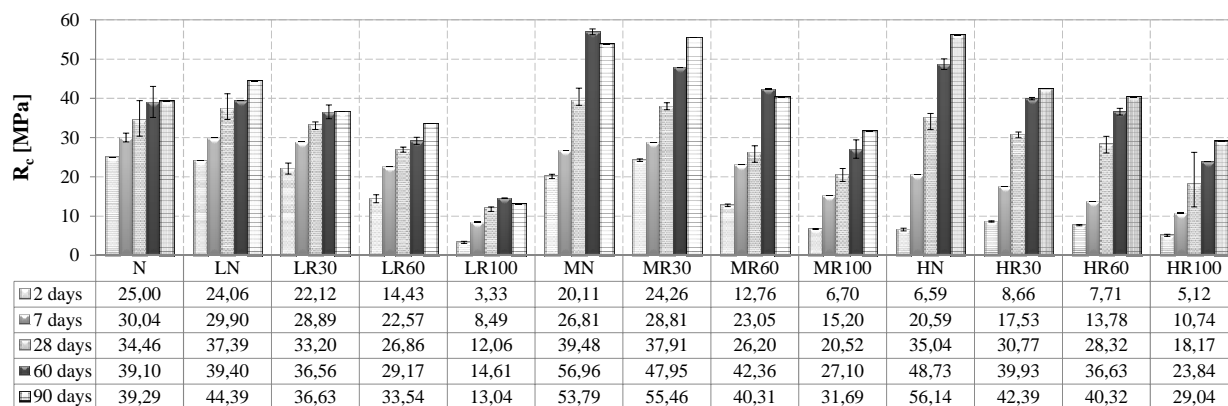


Figura 3. Evoluzione temporale della resistenza cubica a compressione per le 13 diverse miscele studiate.

Il primo gruppo è stato preparato sostituendo 30 kg/m^3 di cemento Portland con un quantitativo equivalente di cenere volante, ai sensi della EN 206 (2006); nel secondo gruppo la quantità di cenere volante è stata aumentata ed è da considerarsi in parte, come per il primo gruppo, in sostituzione del medesimo quantitativo di cemento ed, in parte, quale filler, in sostituzione della frazione più fine di aggregato. Il terzo gruppo si caratterizza per il più elevato rapporto cenere volante/cemento, superiore a quanto consentito dai regolamenti vigenti in materia.

Tutte le miscele sono state progettate per ottenere un abbassamento minimo al cono di 160 mm: tale requisito non è stato soddisfatto nelle miscele con una più elevata percentuale di aggregati riciclati, a motivo della forma irregolare dei grani e del maggiore assorbimento di acqua da parte degli stessi. Tuttavia, tale diminuzione di lavorabilità è stata in parte compensata dall'utilizzo della cenere volante i cui effetti sulla prestazione allo stato fresco, dovuti alla dimensione ed alla forma sferica delle particelle, sono ben noti (Figura 2).

I positivi effetti sinergici dell'uso combinato di ceneri volanti ed aggregati riciclati sono evidenti anche in termini di resistenze a compressione su provini cubici (Figura 3 – ciascun valore è da intendersi come la media di tre risultati sperimentali), eseguite a differenti stagionatura, comprese fra i 2 ed i 90 giorni. In Figura 3 si osserva che la resistenza a compressione per le miscele individuate mediante la sigla "LN" (ossia con la minore percentuale di cenere volante in sostituzione del cemento) è assolutamente confrontabile con quella del calcestruzzo di riferimento "N". Pertanto può asseverarsi, con riferimento alla resistenza a compressione, la equivalenza degli 80 kg/m^3 di cenere volante utilizzati in sostituzione di 30 kg/m^3 di cemento Portland. In particolare, a motivo dell'attività pozzolanica delle ceneri volanti, tale positivo effetto si evidenzia in special modo sulle più

lunghe stagionature: infatti, mentre la resistenza della miscela LN a 7 giorni è inferiore a quella del calcestruzzo di riferimento, essa diviene confrontabile, o leggermente maggiore, alle stagionature di 28 e 60 giorni, ed evidentemente più elevata dopo 90 giorni. Ciò risulta ancor più evidente nelle miscele confezionate con i più elevati dosaggi di ceneri volanti, rispettivamente individuate mediante le sigle "MN" ed "HN". In particolare, dopo 60 giorni, i campioni prodotti con le due miscele sopra indicate hanno fatto registrare valori medi di resistenza di circa il 40% più elevati rispetto a quelli forniti dai campioni di calcestruzzo di riferimento "N" e "LN".

Da ciò può, quindi, affermarsi quanto segue:

- anche il quantitativo di cenere volante che eccedente il 33% del cemento non si comporta come inerte, ma contribuisce a un non trascurabile incremento di resistenza, specie alle lunghe stagionature;
- anche riducendo il contenuto di cemento ben al di sotto dei limiti consentiti dalle vigenti norme europee è possibile raggiungere significative resistenze a compressione dopo 60 giorni di stagionatura (miscele "H").

I risultati sperimentali ottenuti illustrano, inoltre, che la sostituzione di aggregati naturali con aggregati riciclati si ripercuote in significative variazioni della resistenza a compressione [01]:

- all'aumentare della percentuale di sostituzione dell'aggregato naturale con aggregato riciclato corrisponde una diminuzione della resistenza a compressione, indipendentemente dalla stagionatura;
- livelli prestazionali accettabili possono ottenersi per stagionature maggiori dei 28 giorni con elevati quantitativi di ceneri volanti (si vedano ad esempio i risultati delle miscele MR60 e HR60);
- la sostituzione del 30% di aggregate naturali con aggregate riciclati, unitamente all'aggiunta di una moderata quantità di cenere volante (si veda la miscela "LR30") consente di ottenere

un calcestruzzo con prestazioni sostanzialmente equivalenti a quelle del materiale di riferimento, indipendentemente dalla stagionatura (le differenze fra le resistenze della miscela "N" e quelle della miscela "LR30" non sono mai risultate, in media, superiori al 10%);

- d) la parziale sostituzione della frazione più fine di aggregati con cenere volante può portare a significativi incrementi della resistenza a compressione in miscele con elevate percentuali di sostituzione dell'aggregato naturale (si confrontino le resistenze delle miscele "LR100", "MR100" ed "HR100").

Le evidenze sperimentali sopra sintetizzate confermano, come era lecito attendersi, la significativa influenza degli aggregati riciclati sulla resistenza a compressione del calcestruzzo. Ciò è essenzialmente dovuto alla porosità dei grani, significativamente più elevata che per gli aggregati naturali. Tale più elevata porosità comporta non solo una struttura più porosa, e dunque più debole, del composito allo stato indurito, ma gioca un ruolo fondamentale anche nel modificare la reazione di idratazione del cemento, a motivo della più elevata capacità di assorbimento di acqua e dunque della più elevata influenza del contenuto di umidità iniziale degli aggregati sul processo di idratazione. Ciò è stato indagato a fondo [02] ed è, ad esempio, illustrato in Figura 4, mediante le curve di evoluzione temporale del grado di idratazione (ottenuto mediante analisi inversa dei dati misurati in condizioni semiadiabatiche) per calcestruzzi confezionati con aggregati naturali e riciclati. La significativa influenza delle condizioni iniziali di umidità degli aggregati riciclati (secchi o saturi) sulla fase iniziale della idratazione risulta particolarmente evidente, laddove invece essa è ininfluente nel caso degli aggregati naturali.

I risultati sperimentali ottenuti consentono dunque di affermare la piena fattibilità dell'utilizzo di aggregati riciclati per confezionare calcestruzzi in grado di fornire i livelli prestazionali richiesti dalle applicazioni strutturali. In particolare è chiaramente emerso l'effetto "sinergico" dell'utilizzo combinato di aggregati riciclati e ceneri volanti, che consentirebbe di estendere, senza particolari penalizzazioni in termini di resistenza meccanica, quelli che sono gli attuali limiti imposti dalle normative in termini di percentuali di sostituzione tanto degli aggregati naturali con quelli artificiali quanto del cemento con le ceneri volanti. E' tuttavia necessaria una più ampia ed approfondita indagine sui fenomeni di base che controllano la idratazione del cemento nei calcestruzzi confezionati con aggregati riciclati, a complemento di quanto fatto fino ad ora su basi puramente empiriche.

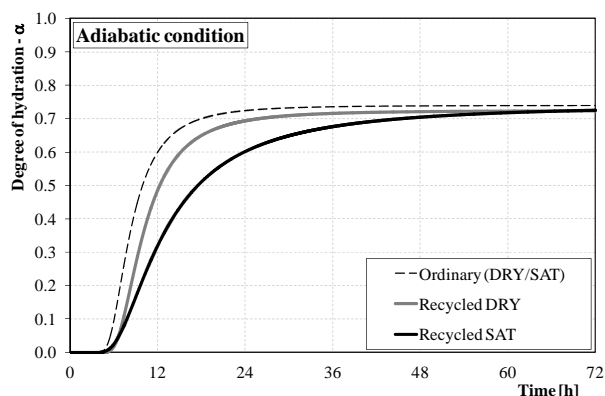


Figura 4: grado di idratazione in calcestruzzi con aggregati naturali e riciclati.



Figura 5: fibre di acciaio riciclate da pneumatici

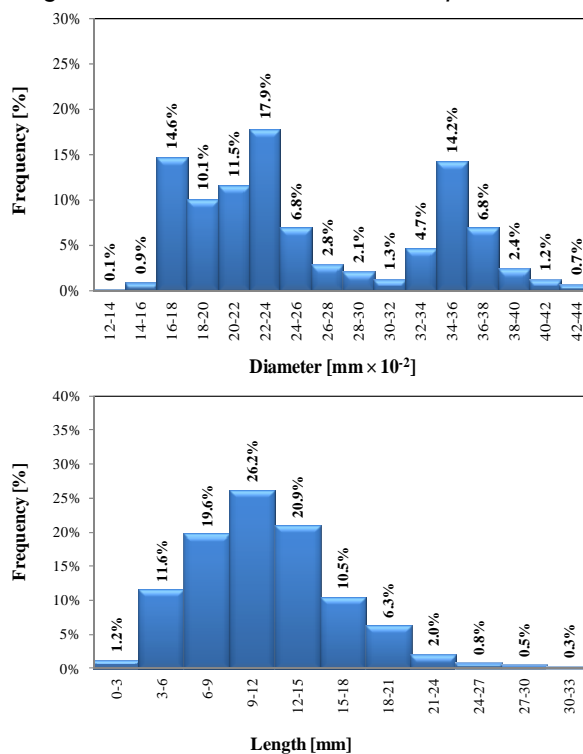


Figura 6: distribuzione dei diametri (a) e delle lunghezze (b) delle fibre riciclate da pneumatici.

4. CALCESTRUZZO RINFORZATO CON FIBRE DI ACCIAIO RICICLATE

Negli ultimi anni lo smaltimento degli pneumatici usati ha raggiunto dimensioni tali da creare serie preoccupazioni e da configurarsi come una realistica minaccia ambientale e per la salute umana. Inoltre, sulla base della Council Directive 1999/31/EC della Commissione Europea sul conferimento a discarica dei rifiuti, a partire dal 2003 gli pneumatici esausti non possono più essere conferiti in discarica e, a partire da luglio 2006 tale direttiva è da applicarsi sia agli pneumatici "interi" sia "ridotti in brandelli". Sussistono pertanto forti motivazioni per riciclare gli pneumatici usati trasformandoli in "fonti" di materie prime seconde con nuovo valore economico.

Il processo di riciclo degli pneumatici usati consiste innanzitutto nel separare il rinforzo metallico interno dalla gomma. Da ciò vengono ottenute particelle di gomma e fibre in acciaio corte, che possono essere utilizzate in diverse interessanti applicazioni, quali ad esempio costituenti del calcestruzzo in parziale o totale sostituzione dei normali "ingredienti". Da un lato infatti le particelle di gomma trovano interessante applicazione in parziale sostituzione degli aggregati lapidei naturali nella produzione del cosiddetto "rubberized concrete" che è caratterizzato da elevate capacità di ammortizzazione degli urti e da elevata tenacità. Dall'altro le fibre metalliche riciclate possono essere utilizzate in alternative a quelle di produzione industriale comunemente impiegate per la produzione di compositi cementizi fibrorinforzati - Fiber-Reinforced Cementitious Composites (FRCCs) [03]. In Figura 5 è mostrato un campione di fibre ottenute dal processo di riciclo degli pneumatici usati; a motivo di ciò esse appaiono deformate in vario modo (piegate, attorcigliate etc.) e le loro dimensioni, tanto il diametro nominale quanto la lunghezza, possono variare entro intervalli di dispersione significativi, come illustrato in Figura 6.

Onde verificare la fattibilità di utilizzo di fibre di acciaio riciclate ottenute da pneumatici usati in sostituzione di quelle di produzione industriale sono stati confezionati, accanto ad un calcestruzzo fibrorinforzato di riferimento, contenente 40 kg/m^3 (0.5% in volume) di fibre di acciaio di produzione industriale, tre miscele, ottenute sostituendo rispettivamente il 25%, 50% e 100% delle suddette fibre con quelle riciclate. I calcestruzzi fibrorinforzati così confezionati sono stati caratterizzati mediante prove di compressione e prove di flessione, condotte

secondo la norma italiana UNI 11039. La Figura 7 presenta le curve carico-apertura di fessura (misurata all'apice dell'intaglio - CTOD Crack Tip Opening Displacement). Si osserva come il comportamento post-fessurativo sia caratterizzato da una crescente fragilità all'aumentare della sostituzione delle fibre di produzione industriale con quelle riciclate, a motivo della minore efficienza di queste ultime rispetto alle prime, la cui forma viene specificamente "progettata" onde ottimizzare la interazione con la matrice circostante. Sulla base dei risultati sperimentali possono trarsi le seguenti considerazioni di carattere e validità generali:

- come era ovvio e lecito attendersi, la resistenza a compressione non è influenzata dal rinforzo fibroso, e la sostituzione delle fibre di produzione industriale con quelle riciclate ottenute da pneumatici, non comporta significative differenze;
- al contrario, anche in questo caso nel pieno rispetto delle aspettative, il comportamento a flessione risulta essere significativamente influenzato dalla tipologia di fibra utilizzata e dunque dal rapporto di sostituzione delle fibre di produzione industriale con quelle riciclate ottenute dagli pneumatici usati.

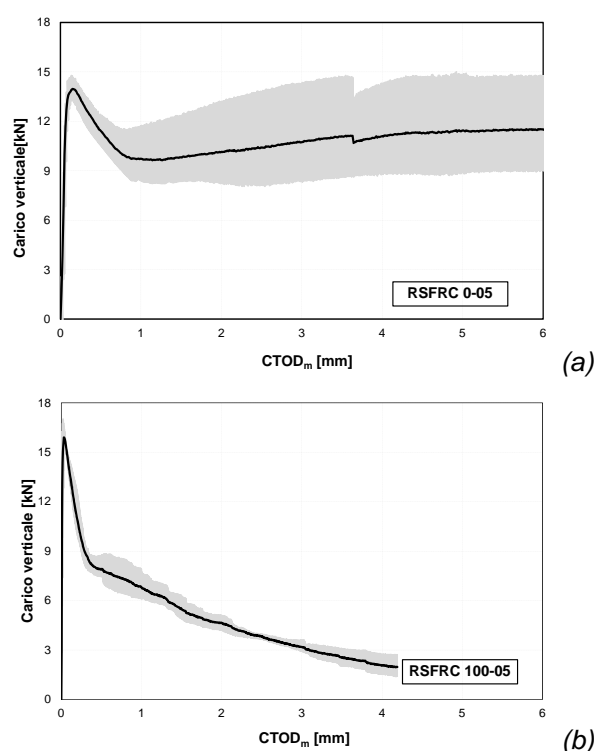


Figura 7: curve carico-CTOD ottenute da prove di flessione a 4 punti (UNI 11039).

La Figura 7 riporta i risultati ottenuti da prove di flessione su quattro punti condotte su provini di FRCC con 40 kg/m^3 (circa lo 0.5% in volume) di

fibre metalliche. In particolare, Figura 7a si riferisce all'impiego di fibre industriali e mostra una significativa duttilità e tenacità del ramo post-picco. Diversamente, Figura 7b riporta i risultati nel caso di impiego esclusivo di un uguale quantitativo di fibre riciclate come quelle rappresentate nella Figura 5. Alla sostanziale invarianza dei valori di picco del carico ottenuti per i due materiali, si contrappone il significativo decadimento della tenacità della risposta post-picco che si evidenzia con un'area della curva carico-CTOD_m molto minore nel caso di fibre riciclate.

Tuttavia è opportuno osservare che, nonostante il quantitativo non elevato del rinforzo fibroso (0.5% in volume) si è osservato un significativo incremento di tenacità rispetto ad un calcestruzzo "bianco" di riferimento, anche nel caso di una completa sostituzione di fibre industriale con riciclate. Un rapporto sperimentale più completo e i risultati di elaborazioni teoriche relative ai materiali testati sono disponibili in una memoria pubblicata in questi atti [04].

5. COMPOSITI CEMENTIZI RINFORZATI CON FIBRE NATURALI

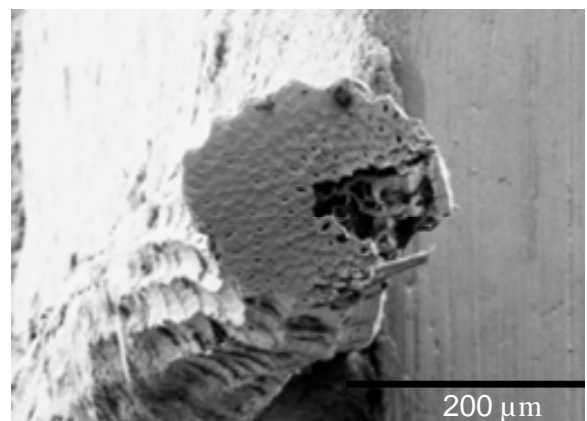
Le fibre naturali possono essere prodotte da una gran varietà di piante. Nell'ambito del progetto EnCoRe la attenzione è stata concentrata sulla fibre di sisal, già studiate ampiamente dal gruppo di ricerca della UFRJ negli ultimi quindici anni.

Le fibre di sisal vengono estratte dalla *agave sisalana*, in forma di lunghi fasci. Una pianta di agave produce tra 200 e 250 foglie prima della fioritura, ciascuna delle quali contiene approssimativamente 700–1400 fasci di fibre, di lunghezza compresa fra 0.5 e 1 m. La foglia della pianta di agave sisalana ha una struttura "a sandwich" composta approssimativamente per il 4% da fibre, per l'1% da cuticola, per l'8% da materia secca e per il rimanente 87% di acqua. Le fibre di sisal hanno un diametro equivalente di circa 200 µm e la loro sezione trasversale è raramente circolare ma più spesso si presenta nelle forme di un ferro di cavallo (Figura 8a) o di un arco (Figura 8b). Dal punto di vista chimico, le fibre di sisal si compongono per il 54-66% di cellulosa, per il 12–17% di emicellulosa, per il 7–14% di lignina, l'1% di pectina e per l'1–7% di cenere [05].

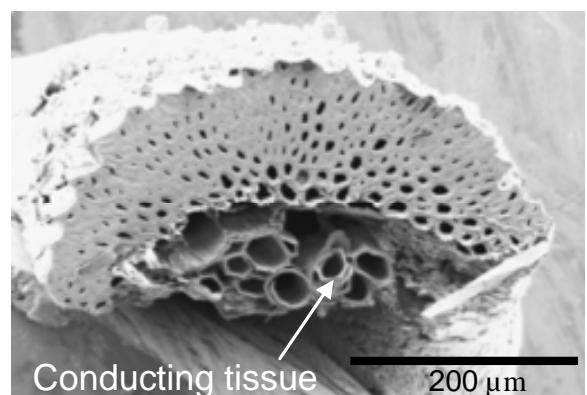
Una delle attività condotte nell'ambito del progetto riguarda l'utilizzo di fibre di sisal in compositi cementizi fibrinforzati ad elevate prestazioni (High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composites - HPFRCCs). Tale categoria di compositi cementizi si distingue per

un "peculiare" comportamento "pseudo plastico" a trazione, caratterizzato da una estesa fase di multi fessurazione stabile con mantenimento della capacità di trasferire sforzo, prima della localizzazione instabile di una fessura dominante.

Peraltro tali materiali, nella cui composizione si impiegano elevate quantità di "materie prime seconde", come ceneri volanti e loppe, quali sostituti del cemento, possono caratterizzarsi altresì per una più ampia valenza del concetto di sostenibilità. Infatti, l'elevato quantitativo di materiali caratterizzati da attività pozzolanica (ceneri volanti) e/o cementizia (loppe), unita a rapporti acqua/cemento generalmente bassi (inferiori a 0.25) fa sì che una gran quantità di materiale "legante" rimanga non idratato; la formazione delle fessure consente all'acqua, anche semplicemente sotto forma di umidità atmosferica, di penetrare all'interno del materiale entrando in contatto con le particelle anidre, attivando delle reazioni di idratazione ritardata i cui prodotti, precipitando all'interno delle fessure, sono in grado di richiuderle (crack self-sealing), se del caso altresì garantendo il recupero delle proprietà fisico-meccaniche ai livelli prestazionali propri del materiale vergine (self healing).



(a)



(b)

Figura 8: fibre di sisal con sezione in forma di ferro di cavallo (a) e ad arco (b)

Tabella 2: composizione delle due miscele di HPFRCC sperimentate

Constituent	Dosage (kg/m ³)	
	HPFRCC ST*	HPFRCC SS
Cement type I 52.5	600	600
Slag	500	500
Water	200	200
Superplasticizer	33 (l/m ³)	40
Sand 0-2 mm	1000	1000
Sisal fibres	-	70
Steel fibres	100	50

La capacità del materiale di “spalmare” il fenomeno fessurativo su un elevato numero di fessure, ciascuna di ampiezza limitata, gioca ovviamente a favore di quanto sopra detto, la efficacia del fenomeno del self healing essendo inversamente proporzionale all’ampiezza della singola fessura. In tale contesto l’uso delle fibre naturali nei compositi cementizi fibrorinforzati ad elevate prestazioni (HPFRCCs) si caratterizza dunque per una duplice valenza. Da un lato infatti esse possono contribuire, come qualsiasi rinforzo fibroso disperso, allo sviluppo del processo di multi-fessurazione stabile. Dall’altro, a motivo della loro natura altamente idrofila e della loro microstruttura porosa, le fibre naturali sono in grado, già durante il processo di mescolamento del calcestruzzo ovvero anche attraverso procedimenti di presaturazione dedicati, di assorbire acqua. Tale acqua, attraverso la stessa microstruttura porosa delle fibre, che, nella matrice cementizia vengono a costituire un vero e proprio “reticolo” di porosità dispersa, può quindi essere rilasciata “a richiesta” in corrispondenza di fessure o danneggiamenti localizzati ed attivare quindi le sopra richiamate reazioni di idratazione ritardate responsabili del self-healing.

L’efficacia di tale concetto è stata valutata, nell’ambito del progetto EnCoRe, con riferimento a due compositi cementizi fibrorinforzati ad elevate prestazioni, uno contenente 100 kg/m³ di fibre metalliche corte (lunghezza della fibra $l_f = 13$ mm; diametro della fibra $d_f = 0.16$ mm) e l’altro contenente un eguale percentuale in volume (1.28%) di rinforzo fibroso, “ibridizzato” in eguali

percentuali volumetriche fra le suddette fibre metalliche e le fibre di sisal (Tabella 2). Queste ultime sono state ottenute da piante di agave coltivate nello stato di Bahia in Brasile e sono state estratte dalle foglie delle piante in forma di lunghi fasci di fibre attraverso un metodo di frantumazione semiautomatico delle foglie stesse, che porta ad una resa di 1.35 kg di fibre ogni 10 kg di foglie.

La superiore prestazione allo stato fresco consente di governare la direzione prevalente del rinforzo fibroso, attraverso un procedimento di getto “progettato ad hoc” (Figura 9). In Figura 10 vengono quindi poste a confronto le risposte flessionali di provini confezionati con le due miscele in funzione della relativa orientazione fra la direzione di sollecitazione e quella prevalente del rinforzo fibroso.

L’efficacia delle fibre naturali nel potenziare i meccanismi di self healing autogeni dei compositi cementizi fibrorinforzati ad elevate prestazioni è stata valutata mediante una metodologia proposta di recente da Ferrara et al. [05] che confronta i risultati di prove di flessione a 4 punti del medesimo provino in fase di pre-fessurazione ed al termine di una fase di esposizione, in diverse condizioni ambientali e per diverse durate temporali (esempio in Figura 11).

In questo lavoro i provini sono stati pre-fessurati ad ampiezze di fessura pari a 0.5 mm, per provini a comportamento softening, e pari a 0.5 mm dopo il picco, per provini a comportamento hardening (Figura 10), e quindi sottoposti a cicli di asciutto bagnato consistenti in una giornata di immersione in acqua seguita da una giornata di esposizione in camera climatica alla temperatura di 20°C ed al 50% di umidità relativa. In Figura 12 si illustrano i risultati ottenuti in termini di un indice di recupero della capacità portante (ISR Index of Stress Recovery) calcolato confrontando l’incremento di sforzo, registrato a partire dal valore di sforzo allo scarico nella fase di prefessurazione, nella prova post-esposizione, con il rilascio tensionale manifestato dal provino vergine nella fase di pre-fessurazione.

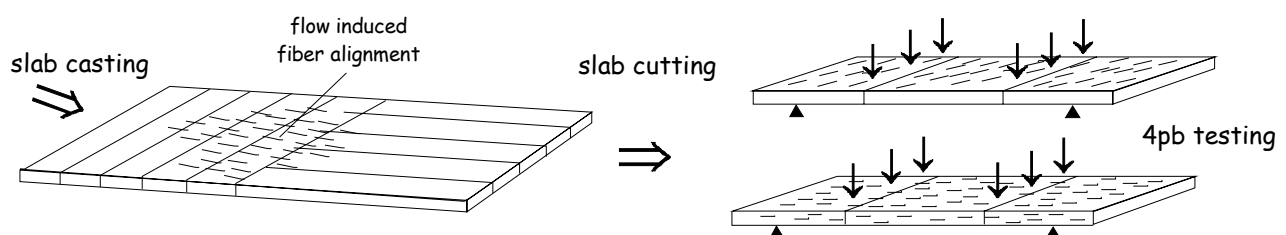


Figura 9: schema della modalità di getto di lastre di grandi dimensioni e di estrazione di campioni per prove di flessione su quattro punti per discriminare l’effetto della relativa orientazione fra la direzione prevalente del rinforzo fibroso, governata dal flusso di getto, e la direzione di sollecitazione flettente.

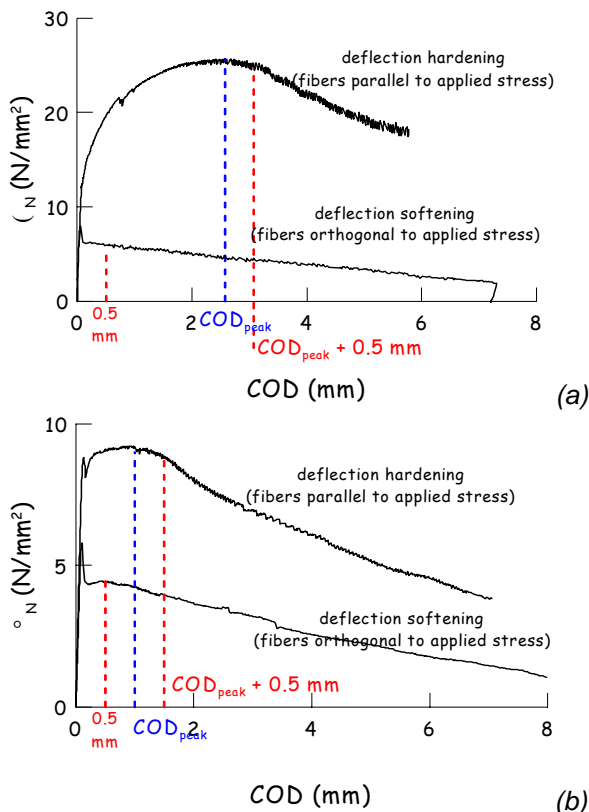


Figura 10: risposta flessionale monotono di provini con mix HPFRCCST (a) e HPFRCCSS (b)

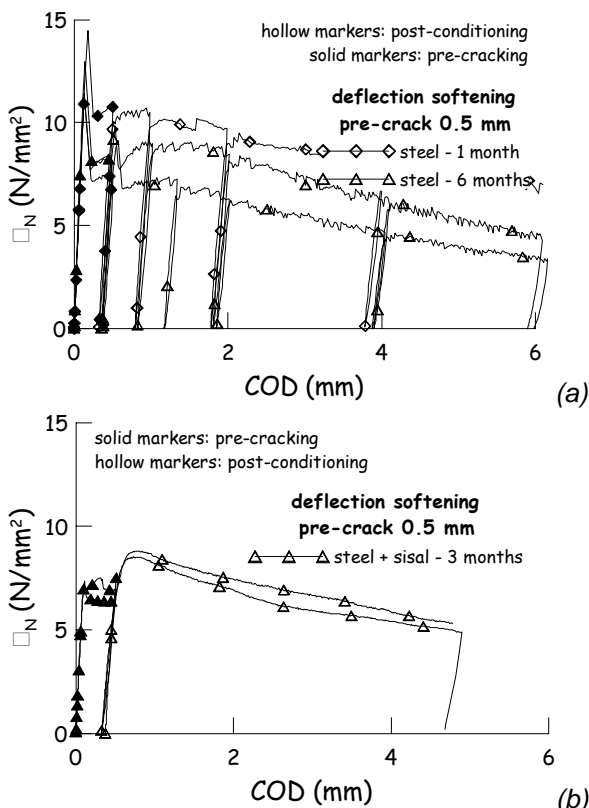


Figura 11. Confronto comportamento flessionale per provini confezionati con mix HPFRCCST (a) e HPFRCCSS (b)

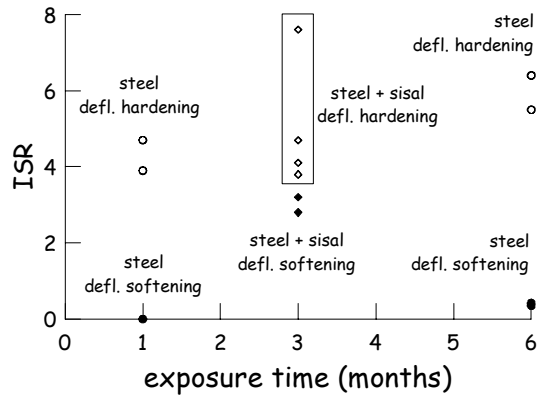


Figura 12: efficacia del self healing: indice di recupero della capacità portante

E' evidente, da quanto mostrato in Figura 12, la maggiore efficacia del self healing in campioni confezionati con rinforzo fibroso ibrido di acciaio e sisal, che già dopo soli tre mesi di esposizione, mostrano, in termini di recupero relativo della capacità portante, prestazioni equivalenti, o superiori, a quanto i provini confezionati con sole fibre di acciaio, manifestano dopo almeno sei mesi. Ciò è testimoniato anche dalla completa richiusura delle fessure osservabile visivamente (Figura 13) e può ragionevolmente attribuirsi alla capacità delle fibre naturali di assorbire acqua durante la fase "umida" dei cicli e rilasciarla gradualmente alla matrice cementizia circostante durante la fase "secca", così promuovendo, anche durante quest'ultima, le reazioni di idratazione ritardata responsabili del self healing.

6. CONCLUSIONI

In questa memoria sono stati illustrati i principali risultati ottenuti nell'ambito del progetto **Environmentally friendly solutions for Concrete with Recycled and natural components- EnCoRe** finanziato dalla Unione Europea nell'ambito del 7° Programma Quadro, (www.encore-fp7.unisa.it), e che vede coinvolte l'Università di Salerno, quale coordinatore, il Politecnico di Milano, la Universidade do Minho (Portogallo), la Universidad de Buenos Aires e la Universidad Nacional de Tucuman (Argentina) e la Universidade Federal do Rio de Janeiro (Brasile).

Le attività condotte nell'ambito del progetto, oltre a consolidare i rapporti di cooperazione internazionale fra gruppi di ricerca universitari di eccellenza, hanno fornito un'ampia panoramica sulle possibilità di utilizzo di materie prime seconde, di diversa natura e provenienza, quali costituenti di calcestruzzi e compositi a matrice cementizia, evidenziando le elevate potenzialità di "valenza ambientale" di tali materiali da costruzione, i più utilizzati a livello planetario.

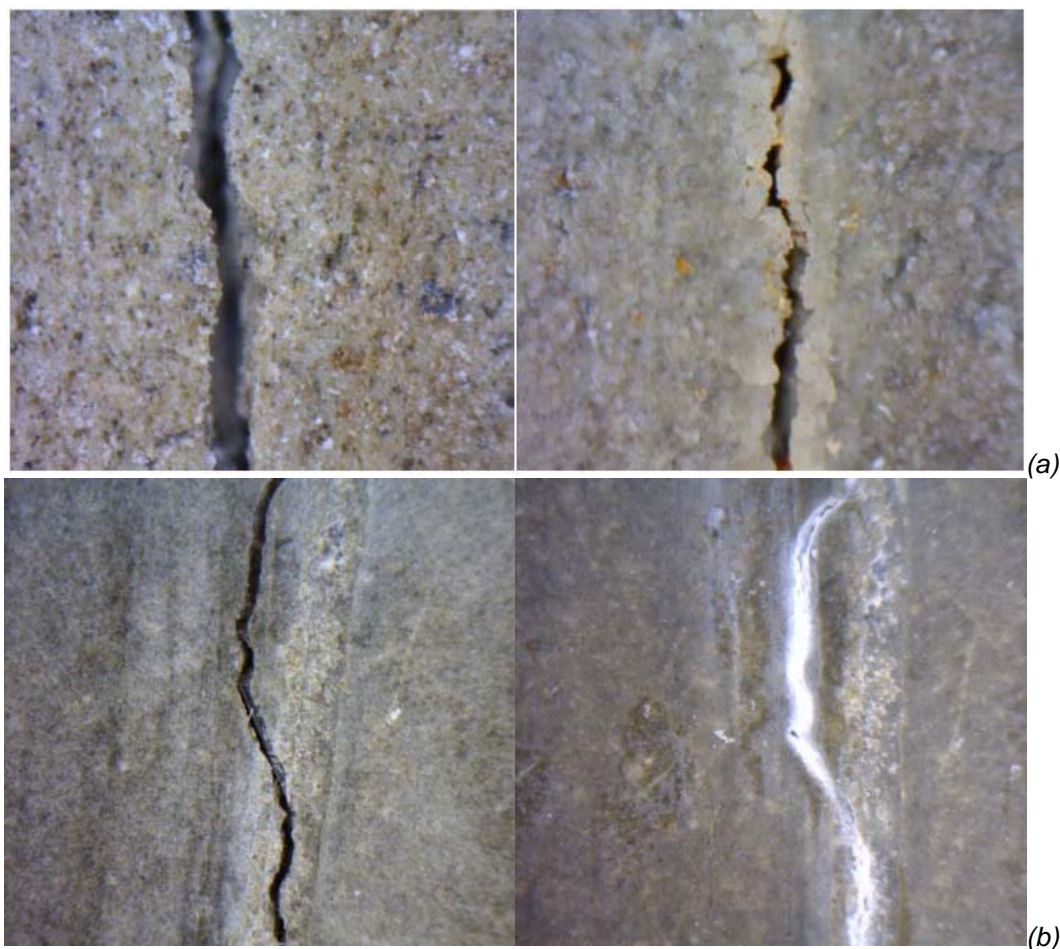


Figura 13: fessura parzialmente richiusa in provini confezionati con mix HPFRCCST (a) e completamente richiuse nei provini confezionati con mix HPFRCCSS (b) – scale di ingrandimento diverse.

BIBLIOGRAFIA

[01] LIMA, C., CAGGIANO, A., FAELLA, C., MARTINELLI, E., PEPE, M., REALFONZO, R.: "Physical properties and mechanical behaviour of concrete made with recycled aggregates and fly ash", *Construction and Building Materials*, 47, (2013), pp. 547-559.

[02] KOENDERS, E.A.B., PEPE, M., MARTINELLI, E.: "Compressive strength and hydration processes of concrete with recycled aggregates", *Cement and Concrete Research*, 56, (2014), pp. 203-212.

[03] BARROS, J.A.O., ZAMANZADEH, Z., MENDES, P.J.D., LOURENÇO, L.A.P.: "Assessment of the potentialities of recycled steel fibres for the reinforcement of cement based materials, in L. Coppola et al., eds., *Proc. 3rd workshop ACI Italy chapter, Bergamo, 3-4 November 2013*, pp. 249-260.

[04] CAGGIANO, A., XARGAY, H., FOLINO, P.C., MARTINELLI, E.: "Calcestruzzi rinforzati

con fibre metalliche riciclate: Studio sperimentale e modellazione teorica", in *Atti del 20° Congresso C.T.E., Milano 6-7-8 Novembre 2014*.

[05] SILVA, F., TOLEDO FILHO, R.D., MELO FILHO, F.A., FAIRBARN, E.M.R.: "Physical and mechanical properties of durable sisal fiber cement composites", *Construction and Building Materials*, 24, (2010), pp. 777-785.

[06] FERRARA, L., KRELANI, V., CARSANA, M.: "A fracture testing based approach to assess the crack healing of concrete with and without crystalline admixtures", *Construction and Building Materials*, 68 (2014), 535-551.

Contatti con gli autori:

Enzo Martinelli: e.martinelli@unisa.it

Joaquim A.O. Barros: barros@civil.uminho.pt

Guillermo Etse: getse@herrera.unt.edu.ar

Liberato Ferrara: liberato.ferrara@polimi.it

Paula C. Folino: pfolino@fi.uba.ar

Eduardus Koenders: e.a.b.koenders@tudelft.nl

Romildo D. Toledo Filho: toledo@coc.ufri.br