

DESIGN MIX

L'ANIMA NUOVA DEI CLS LEGGERI STRUTTURALI

Si sta mettendo a punto la "ricetta", cambiando un ingrediente: granuli di PET o plasmix al posto dell'aggregato minerale. Con un aumento di consistenza ed efficienza strutturale. Un *work in progress* italiano, europeo e asiatico. Ad alto tasso di interesse

di Ornella Fiandaca



Segregazione superficiale nella miscela M2.1 e confronto con la precedente M2.1

Prove di resistenza a compressione e confronto fra le rotture dei provini M3.11 e quello del cls di riferimento M0.11

Prove di resistenza a flessione e confronto fra le rotture del prisma M2.11 e quello del cls di riferimento M0.11



La base di partenza scientifica di questo studio si compone di due filoni di ricerca - l'uno italiano, l'altro, più nutrito, sviluppato in Eurasia - differenti come impostazione e metodo ma con analoga finalità: quella di impiegare aggregati plastici riciclati nella composizione di calcestruzzi in sostituzione dell'aggregato minerale.

Sono state discusse in precedenza (questo studio segue due lavori precedenti: Fiandaca O., Lione R., Aggregati plastici riciclati per calcestruzzi: dalla sperimentazione alla produzione, in Il riciclaggio come pratica virtuosa per il progetto sostenibile, Roma 2015; Fiandaca O. Aggregati plastici riciclati per calcestruzzi leggeri strutturali. Prime capitalizzazioni degli esiti di ricerche sperimentali a confronto. In Concreto-net, luglio 2015) finalità e risultanze di entrambe le linee investigative condotte rispettivamente per concepire:

un calcestruzzo leggero strutturale, sostituendo la frazione medio-grossa (8/16) dell'aggregato minerale con granuli di PET sabbati, con distribuzione dimensionale equivalente;

un calcestruzzo ordinario, sostituendo percentuali della frazione fine (0/4) dell'aggregato minerale con scaglie o granuli di PET o plasmix (plastiche miste).

Gli studi analizzati hanno reso disponibile una valutazione ingegneristica delle prestazioni allo stato fresco e allo stato indurito dei calcestruzzi testati, consentendo di desumere, mediante la comparazione dei dati disponibili, alcuni nodi problematici che richiedono ulteriori approfondimenti.

In sintesi occorre ancora determinare:

quale frazione granulometrica dell'aggregato minerale, se fine, media o grossa, sia più efficace sostituire con aggregato plastico, per ottenere la maggiore riduzione della massa volumica;

l'influenza della forma, granuli o scaglie, dell'aggregato plastico sulle prestazioni meccaniche - resistenza a compressione, a flessione, agli urti - e la necessità di un trattamento superficiale per migliorare l'aderenza fra i componenti della miscela;

i valori di soglia, minimo e massimo, per morfologia e distribuzione granulometrica determinati, che rendono la sostituzione congruente con le istanze ambientali (minimo) e tecniche (massimo);

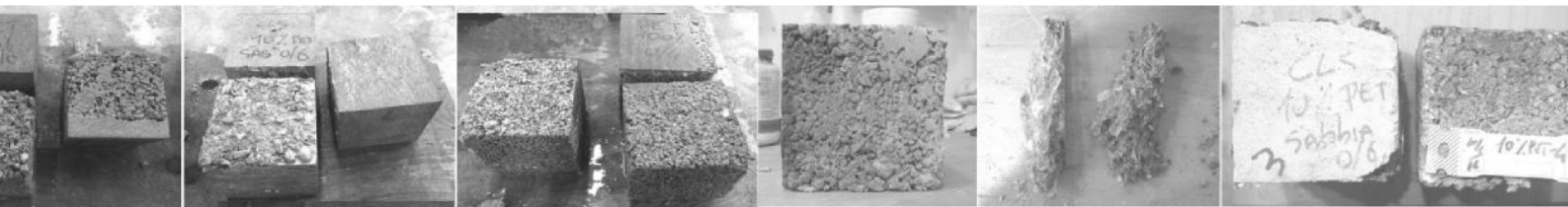
gli effetti dell'introduzione di aggregato plastico sul meccanismo di rottura.

Pertanto, insieme al team del LaMaS, con la finalità di ottimizzare le ricette per un calcestruzzo leggero strutturale, testando diverse "risorse plastiche", si è avviato un programma di prove sperimentali del quale si esplicitano presupposti, criteri ed esiti.

IL "VAGLIO" DEGLI AGGREGATI PLASTICI RICICLATI

Una prima difficoltà con la quale ci si è dovuti confrontare, non certo trascurabile, ha riguardato proprio l'approvvigionamento delle materie prime seconde. Un'indagine nel mercato edile, condotta in ambito nazionale, ha chiarito che non ci sono ancora sul territorio produttori di aggregato plastico riciclato di alcun tipo, forma e granulometrica. L'unica sabbia sintetica, la R-PMIX-CEM, specificamente brevettata per malte e calcestruzzi dalla Promeco nell'ambito delle ricerche correlate Remix4, non è più in produzione.

Si è pertanto selezionato, fra le disponibilità in ambito siciliano, un semilavorato composto da scaglie di polietilene tereftalato (PET) prodotto dalla Ecoambiente di Gela. L'analisi granulometrica, condotta presso il Laboratorio di Geotecnica 5 del Dipartimento di Ingegneria adottando la UNI EN 933-16, ha evidenziato una di-



1° Fase di sperimentazione				2° fase di sperimentazione					
Cod	Ag Pla % Ag Min	Classe Sn Slump (mm)	Rm (N/mm ²)	Cod	Ag Pla % Ag Min	Classe Sn Slump (mm)	Rm (N/mm ²)		fcf (N/mm ²)
			28gg				14gg	28gg	28gg
M0.I	PET 0%	S5 - 265	27,50	M0.II	PET 0%	S3 - 135	nn ril	39,40	4,80
M1.I	Sc PET 0/4 100% SF0/4	S4 - 180	0,70	M1.II	Sc PET 0/4 100% SF0/4	S4 - 155	4,40	5,90	1,30
M2.I	Sc PET 0/6 10% SL0/6	S3 - 115	18,40	M2.II	Sc PET 0/6 10% SL0/6	S2 - 65	13,20	14,10	2,80
M3.I	Sc PET 0/6 25% SL0/6	S4 - 165	7,00	M3.II	Pi PET 7/15 15% Pi7/15	S0 - 5	29,80	33,20	3,80

SF: Sabbia Frantumata; SL: Sabbia Lavata; gL: ghiaietto Lavato; GL: Ghiaia Lavata

istribuzione dimensionale, della frazione derivata da quartatura, equivalente all'intervallo 0/6 attribuibile sia a sabbie fluviali che di cava. Si è riproposta più volte la prova, con quartature differenti, per verificare se la forma piatta delle scaglie di PET avesse un'influenza sul criterio normativo prescritto per elementi morfologicamente tridimensionali. La ripetitività del risultato ha confortato sulla correttezza dell'applicazione. Dalle scaglie di PET, impiegate in una prima fase di sperimentazione (giugno-luglio 2015), abbiamo ricavato un quantitativo di granuli, presso il Laboratorio di Scienza e Tecnologia dei Materiali 7 del Dipartimento di Ingegneria, mediante trattamento termico in forno a 250° per 30 minuti successiva frantumazione del materiale parzialmente agglomerato. L'aggregato ottenuto è stato sottoposto a una nuova setacciatura per ricavare la frazione 4/15, equivalente alle dimensioni del ghiaietto-pietrischetto, impiegata in una seconda fase di sperimentazione (gennaio-febbraio 2016).

PRESTAZIONI DEI CALCESTRUZZI

Per la definizione delle miscele da testare sono state prese in esame le ricette impiegate negli studi pregressi, al fine di avere termini di raffronto nella valutazione degli esiti delle prove sperimentali. Certamente si è guardato alle quantità di aggregato minerale sostituite nelle diverse miscele in essiproposte, con l'intenzione di scartare soluzioni che avevano prodotto riduzioni particolarmente onerose delle prestazioni. Questa valutazione orientativa ha guidato nella definizione di un intervallo compreso fra una soglia minima del 10% e una massima del 25%. Si è ritenuto che al di sotto del primo valore sarebbe stato irrilevante il beneficio ambientale indotto per l'esiguo

impiego di "rifiuti plastici", mentre si è osservato che al di sopra del secondo valore la resistenza meccanica per ciascuna miscela testata subiva una riduzione inaccettabile rispetto a quella di riferimento.

La prima fase di sperimentazione, servita per affinare un metodo, è stata condotta su una miscela con classe di esposizione XC1-XC2-XC3, Rck dichiarato 35 N/mm², consistenza S5 superfluida, in produzione presso la centrale di betonaggio Margherita di Messina, assunta come calcestruzzo di riferimento.

Sono state effettuate due sostituzioni percentuali del 10% e del 25% di sabbia lavata 0/6 e una totale di sabbia frantumata 0/4 con equivalenti frazioni granulometriche di scaglie di PET e quindi valutate le prestazioni allo stato fresco (*slump*) e allo stato indurito (resistenza a compressione Rma 28 gg) delle miscele di calcestruzzo così modificate.

L'indagine ha evidenziato che:

le scaglie di PET non hanno generato alcun problema di galleggiamento per una sostituzione del 10 % di sabbia lavata 0/6 confermata anche dall'esame visivo delle superfici interne dopo le prove a rottura; al contrario la sostituzione dell'intera % di sabbia frantumata 0/4 ha indotto un affioramento superficiale visibile anche a un'analisi macroscopica dei provini; la sostituzione del 25% ha evidenziato una buona distribuzione del PET ma una scarsa coesione della matrice cementizia con gli aggregati;

la consistenza aumenta (da S5-superfluida a S3-plastica) fino a una certa soglia di sostituzione, laddove sembrano fluire la forma delle scaglie di PET, più angolate e nitide rispetto alla sabbia, che producono una minore plasmabilità della miscela, non sempre accompagnata comunque da una più ridotta lavorabilità; superato tale limite la consistenza torna a farsi fluida (da S3-pla-

stica a S4-fluida), in quanto sarebbe prevalente l'effetto della quantità di acqua libera non assorbita dagli aggregati minerali sostituiti; le resistenze a compressione ottenute inducono a ritenere, per la miscela in esame, una sostituzione del 10% AggPla/AggMin accettabile, con una riduzione dell'Rm del 33% e dell'efficienza strutturale del 30%, mentre le altre improponibili; anche in questo caso però la massa volumica (2311,10 kg/m³) non è scesa al di sotto della soglia massima di 2000 kg/m³ prevista per i calcestruzzi leggeri strutturali. A partire da tali risultati si è programmata una seconda fase di sperimentazione, selezionando un'altra miscela per il calcestruzzo di riferimento, in produzione presso l'Alessandro di Oliveri, con classe di esposizione XC1, Rck di 30 N/mm², consistenza S4 e distribuzione granulometrica dell'aggregato che presenta uno scostamento medio di 0,1 rispetto alla curva ottimale di Bolomoy. Per due miscele modificate sono state impiegate ancora le scaglie di PET, riproponendo la sostituzione dell'intera frazione di sabbia frantumata 0/3 in M1.II ed il 10% della frazione di sabbia lavata 0/6 in M2.II, con equivalenti distribuzioni "granulometriche"; quindi si è composta una terza miscela, la M3.II, in cui si è sostituito il 15% di pietrisco 7/15 con granuli di PET prodotti come indicato in precedenza. La corrispondenza biunivoca che ci si sarebbe attesi fra lavorabilità e consistenza, è stata disattesa dalla valutazione empirica e strumentale. Esemplici i casi delle due miscele M1.II ed M3.II. Per la prima, rivelatasi scarsamente lavorabile per un tendenziale deposito della pasta cementizia in basso e una segregazione degli aggregati, difficili da omogeneizzare, si è misurato un grado di consistenza S5-superfluida, generalmente auspicata. Contrariamente, alla buona lavorabilità percepita per la seconda, confermata da



una distribuzione omogenea e indistinguibile delle diverse componenti minerali e plastiche di aggregato, è corrisposta una consistenza S0-asciutta, solitamente poco gradita. Queste valutazioni debbono essere approfondite e ricondotte al ruolo del PET, introdotto in forme, dimensioni. Un altro dato significativo per la produzione di un calcestruzzo leggero strutturale è la sua massa volumica, misurata sia allo stato fresco che indurito. Tale secondo valore avrebbe dovuto scendere al di sotto di 2000 kg/m³. Il risultato è stato raggiunto unicamente per le miscele M1.II ed M2.II (solo lievemente superiore). Le proprietà meccaniche sono state determinate, presso il LaMaS, secondo le UNI EN 12390-3 e UNI EN 12390-5 per determinare rispettivamente la resistenza a compressione R_m e la resistenza a flessione f_{ct}; in tal caso l'allestimento della prova, eseguita a carico centrato, è stato integrato con il posizionamento di 3 trasduttori di spostamento aventi corsa di 10 mm per rilevare gli spostamenti in mezzeria ed agli appoggi. Un risultato inatteso ha suscitato una riconsiderazione della possibilità di definire valori di soglia, prima ipotizzata. La sostituzione del 10% di PET alla sabbia lavata 0/6 ha prodotto nella seconda fase di sperimentazione risultati assai peggiori rispetto a quelli ottenuti nella prima. Una riflessione sulle motivazioni ha chiarito che non è possibile stabilire un limite % di sostituzione, quanto piuttosto un quantitativo sostenibile in virtù della miscela; quindi un nuovo indicatore dovrebbe entrare a far parte del mix design per i calcestruzzi con aggregati plastici. Tuttavia dovendo orientare gli sviluppi della ricerca, prima di inoltrarsi nella ricerca di tale "algoritmo", occorre prendere atto che le prestazioni allo stato indurito della miscela ottenuta con la sostituzione del 15% di pietrisco 7/15 con granuli di PET, sono praticamente equiparabili a quelle del calcestruzzo di riferimento, evidenziando il maggiore contributo fornito, alle proprietà meccaniche, dalla componente fine dell'aggregato minerale rispetto a quella medio-grossa; inoltre sembra avere una rilevante influenza la forma dell'aggregato plastico, non tanto per problemi di galleggiamento che non sono stati osservati in nessuna delle miscele te-

state, ma piuttosto nel maggiore o minore impedimento prodotto alla capacità di idratazione del cemento e al legame con gli altri granuli. Il ruolo assunto dalle scaglie di PET nelle miscele M1.II ed M2.II si desume, intanto, dall'evidenza di un affioramento superficiale dell'aggregato minerale che determina una superficie assai porosa attraverso la quale, nel processo di stagionatura in vasca, continua a permeare acqua che può intervenire a modificare il rapporto a/c, motivando una eccessiva riduzione della resistenza; ancora, dalla parziale umidità che i provini hanno esibito all'atto delle prove, assente solo nei tre della miscela M1.II lasciati a stagionare fuori dalla vasca; infine da un effetto barriera osservato con l'analisi macroscopica della struttura interna dei provini portati a rottura. Circostanze, queste, che non si sono manifestate nel caso in cui la sostituzione è stata fatta con granuli frantumati di PET, per i quali sembra non vi sia stata alcuna palese interferenza negativa con la distribuzione degli aggregati minerali né con l'idratazione del cemento; inoltre i provini tirati fuori dalla vasca hanno mostrato una superficie omogenea e asciutta. Pertanto è comprensibile il risultato perseguito per la miscela M3.II: la resistenza a compressione ha comportato una riduzione della R_m del 16% e dell'efficienza strutturale del 10% rispetto ai valori del calcestruzzo di riferimento; pur tuttavia la sostituzione adottata, pari al 15%, non ha determinato una significativa diminuzione della massa volumica, tale da far categorizzare il calcestruzzo derivato come leggero strutturale.

Un'ultima considerazione riguarda la maggiore duttilità attribuita in letteratura ai calcestruzzi con aggregati plastici riciclati. Certamente la prova a flessione ha evidenziato l'assenza di una rottura fragile nelle miscele M1.II e M2.II con scaglie di PET, con manifestazione nei prismi di lesioni, non in mezzeria, e non di fratture nette, se pure per carichi inferiori. Un comportamento fragile, con deformazioni inferiori a parità di carichi applicati, è stato il risultato conseguito per la miscela M3.II. La resistenza a flessione, in tutti i casi, ha comunque prodotto, se rapportata al valore assunto per la miscela M0.II, un decadi-

mento comparativamente inferiore rispetto ai corrispondenti valori di resistenza a compressione. Osservando l'andamento della curva sforzo flessionale - deformazione, valutata come rapporto tra il cedimento e la corsa totale dei trasduttori, si rileva un netto distacco tra la miscela contenente le scaglie di PET 0/4 a completa sostituzione della sabbia frantumata 0/4 rispetto alle altre, a testimoniare una perdita di tenacità del materiale, per effetto della scadente coesione degli aggregati alla matrice cementizia.

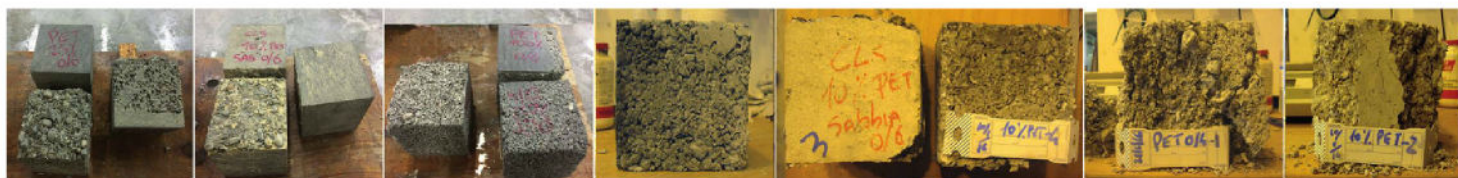
GLI SVILUPPI FUTURI

Dalle due fasi di sperimentazione, singolarmente e comparativamente indagate, emerge l'influenza della forma e della dimensione degli aggregati plastici riciclati sulle prestazioni del calcestruzzo. Un dato che induce a procedere guardando alla sostituzione della componente medio-grossa, con la finalità di affinare la miscela per ridurre il peso al di sotto della soglia prevista per rientrare nella categoria dei leggeri strutturali.

Uno studio mineralogico-petrografico deve essere inoltre condotto, in parallelo, per consolidare e comprendere i rapporti reologici fra le componenti dei calcestruzzi testati, certamente per quelli che hanno dato risultati adeguati alle aspettative; un'analisi al microscopio servirà per definire la zona di transizione matrice cementizia - aggregato plastico e verificare quindi, in funzione dell'andamento, le caratteristiche di aderenza, l'interferenza con gli aggregati minerali, l'influenza sul comportamento a rottura.

Ornella Fiandaca
Dipartimento di Ingegneria
Università degli Studi di Messina

Team del Laboratorio di sperimentazione e prove su Materiali e Strutture (LaMaS) - Dipartimento di Ingegneria
Paolo Longo - Tecnico di Laboratorio
Natale Maugeri - Tecnico di Laboratorio
Fabio Raffone - Contrattista
Renato Ioppolo - tesista CLM Ingegneria Edile per il Recupero



I provini confezionati per la prima fase di sperimentazione (sostituzione con scaglie di PET 25% SL 0/6e totale SF 0/4)

Segregazione superficiale nella miscela M2.II

Confronto superficiale fra i provini M2.I ed M2.II

Comportamento a rottura dei provini M1.I ed M2.I