

Malte e massetti contenenti inerti polimerici riciclati da scarti industriali e pneumatici

RICERCA E
SPERIMENTAZIONE/
RESEARCH AND
EXPERIMENTATION

Valentina Marino¹, Marco Dutto¹, Alessandro Pasquale Fantilli², Diana Yanover³, Luigi Russo⁴,

¹Vimark srl, Italia

²Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino, Italia

³Tyrec Tire Recycling Industry, Israel

⁴Manifattura Russo Filippo, Italia

valentina.marino@vimark.it

marco.dutto@vimark.it

alessandro.fantilli@polito.it

diana@tyrec.com

luigi.russo@filipporusso.it

Abstract. Per rispondere alla crescente domanda di mercato di prodotti contenenti componenti riciclati, richiesti dalle politiche europee e nazionali, si presentano i risultati di una ricerca volta a sostituire una parte degli inerti naturali di malte da costruzione e massetti con aggregati polimerici riciclati: tecnopolimeri industriali e gomma derivante da pneumatici macinati. La strategia ha previsto la sostituzione degli aggregati sia in prodotti già commercializzati, sia nella progettazione di malte standard, verificandone la certificabilità CE nel primo caso e le prestazioni meccaniche raggiungibili nel secondo. L'intero processo è stato discusso secondo un approccio circolare esteso all'analisi della produzione degli aggregati, ragionando sui fattori ambientali ed economici.

Parole chiave: Prodotti premiscelati in polvere; Tecnopolimeri; Pneumatici macinati riciclati; Approccio circolare al prodotto; Valorizzazione degli scarti.

Obiettivi della ricerca

Il mercato dei prodotti da costruzione è caratterizzato da una crescente

domanda di prodotti con componenti riciclati, dovuta alle priorità ambientali espresse dalle politiche europee. Il piano d'azione europeo per l'economia circolare, integrato nel Green Deal Europeo, sottolinea l'importanza di migliorare le prestazioni dei prodotti da costruzione per ridurre l'impatto ambientale integrando componenti riciclati (European Commission, 2020). In Italia, le specifiche tecniche per i componenti edilizi dei Criteri Ambientali Minimi (CAM edilizia) riflettono questi requisiti (DM 11, 2017). Inoltre, l'articolo 34 del Codice Appalti ha reso obbligatorio l'uso dei CAM edilizia negli appalti pubblici (D.Lgs. 18/04/2016 n° 50).

Il progetto POLYWORK si inserisce in questo contesto con l'obiettivo di sviluppare prodotti da costruzione circolari con componenti riciclati, sia modificando prodotti già commercializzati sia sviluppando nuove formulazioni in grado di soddisfare i requisiti minimi normativi per la commercializzazione nel mer-

Mortars and screeds containing polymeric aggregates recycled from industrial waste and tyres

Abstract. Given the growing market demand for products containing recycled components dictated by European and national policies, the presented research aimed to replace part of the natural aggregates in construction mortars and screeds with recycled polymeric aggregates (RA): industrial technopolymers and ground tyre rubber (GTR). The strategy involved the substitution of aggregates, both in market products and in the design of standard mortars, first verifying the CE certification and then the achievable mechanical performance. The whole process has been discussed in the context of a circular approach, extended to the analysis of the aggregate production phase, highlighting factors that influence environmental and economic impacts.

Keywords: Premixed powdered products; Engineering plastics; Recycled ground tyres; Circular product approach; Waste recovery.

cato europeo. La ricerca nasce dalla volontà aziendale di sperimentare le possibilità di adattamento di prodotti convenzionali per rispondere alle rinnovate richieste del mercato dettate dalle politiche europee e nazionali.

La sperimentazione propone una soluzione per ridurre il consumo globale di inerti e risorse naturali, che in edilizia attualmente supera i 40 miliardi di tonnellate all'anno, pari al doppio dei sedimenti trasportati ogni anno da tutti i fiumi della terra (Milliman *et al.*, 1992). La scelta di lavorare con aggregati di tipo polimerico, tecnopolimeri industriali e gomma derivata dal riciclaggio di pneumatici, risponde alla necessità di valorizzare prodotti ad elevato impatto ambientale destinati allo smaltimento in discarica. L'industria della trasformazione dei tecnopolimeri produce scarti e sfridi di solito riutilizzati come materie prime seconde. I tecnopolimeri scelti per questa sperimentazione non possono essere riciclati e a fine vita sono adatti solo per la termovalorizzazione o lo smaltimento in discarica. La regolamentazione mondiale impone il riciclaggio di copertoni degli automezzi, generando così un'ampia disponibilità di GTR, tale da superare la domanda derivante dalle possibilità applicative attuali, che hanno bisogno quindi di essere incrementate e diversificate.

Stato dell'arte dei prodotti cementizi compositi con aggregati polimerici riciclati

Negli ultimi decenni sono state svolte numerose ricerche sull'integrazione di scarti di plastica o gomma riciclati come inerti artificiali nei calcestruzzi

Research objectives

The market for construction products is characterised by a growing demand for products with recycled components due to the environmental priorities expressed by European policies. The European Action Plan for the Circular Economy, integrated in the European Green Deal, stresses the importance of improving the performance of construction products to reduce their environmental impact by integrating recycled components (European Commission, 2020). In Italy, the technical specifications for building components of the Minimum Environmental Criteria (CAM edilizia) reflect these requirements (DM 11, 2017). Furthermore, Article 34 of the Procurement Code has made the use of CAM edilizia mandatory in public procurement (D.Lgs. 18/04/2016 n° 50).

The POLYWORK project is part of

this context with the aim of developing circular construction products with recycled components, either by modifying already marketed products or by developing new formulations able to meet the minimum regulatory requirements for marketing in the European market. The research stems from the company's desire to test the possibilities of adapting conventional products to meet renewed market demands dictated by European and national policies.

The experimentation responds to the aim of reducing the global consumption of aggregates and natural resources, which in construction currently exceeds 40 billion tons per year, equal to twice the sediment transported each year by all the rivers on earth (Milliman *et al.*, 1992). The choice of working with polymer aggregates, industrial techno-polymers and rubber

e nelle malte, dimostrando che sabbie e ghiaie possono essere efficacemente sostituite (Sofi, 2017). Tutti gli studi sono concordi nel fatto che questi aggregati riciclati (RA) riducono la densità del materiale per il minore peso dell'inerte riciclato, peggiorano le proprietà meccaniche (resistenza a compressione, flessione e taglio) a causa dell'aumento di porosità e dello scarso legame interfacciale tra gli aggregati e il legante (Iucolano *et al.*, 2016). Gli effetti possono variare rispetto alle quantità e al tipo di plastica utilizzati. Se la sabbia è sostituita solo parzialmente, le formulazioni sono comunque in grado di raggiungere i valori di resistenza minimi sia per le malte strutturali che per i calcestruzzi leggeri (Saikia and de Brito, 2012). Invece migliora fortemente il comportamento post rottura di malte e calcestruzzi, aumentando la duttilità, riducendo la propagazione di micro-fessure (Fantilli *et al.*, 2018; Araujo-Morera *et al.*, 2021; Adesina and Das, 2021) e permettendo di prevenire grandi fessurazioni del materiale (Turatsinze *et al.*, 2005).

I calcestruzzi e le malte a base di cemento che incorporano particelle di gomma o plastica, se sottoposte ad azioni sismiche, possono dissipare grandi quantità di energia e potenzialmente resistere più a lungo (Marzouk *et al.*, 2007) anche grazie alla riduzione del peso proprio dell'edificio che influisce sull'impatto delle scosse (Ibrahim *et al.*, 2020). Il riutilizzo della plastica di scarto nei prodotti a base-cemento è visto come soluzione per ridurre l'abbondanza di rifiuti solidi a base plastica in ambiente o conferiti in discarica (Gu and Ozbakkaloglu, 2016).

Alcuni studi hanno dimostrato che l'integrazione di questi aggregati influisce positivamente sulla riduzione della conduttività termica e sull'assorbimento acustico di questi materiali (Araujo-Morera *et al.*, 2021; Xuemiao *et al.*, 2020). Il rilascio di fumi

derived from recycled tyres responds to the need to valorise products with a high environmental impact destined for landfill. The polymer processing industry produces waste and scrap that is usually reused as a secondary raw material. The engineered polymers chosen for this trial cannot be recycled and at the end of their life are only suitable for incineration or landfill. Worldwide regulation requires the recycling of vehicle tyres, thus generating a large availability of GTR, which exceeds the demand resulting from the current application possibilities, and therefore, needs to be increased and diversified.

State of the art of cementitious composite products with recycled polymer aggregates

In the last decades, numerous research projects have been carried out on the integration of recycled plastic or rub-

ber waste as artificial aggregates in concretes and mortars, showing that sands and gravels can be effectively replaced (Sofi, 2017). All studies agree that these recycled aggregates (RA) decrease the density of the material due to its reduced weight, while worsening the mechanical properties (compressive, flexural and shear strengths) due to the increase in porosity and the poor interfacial bond between the aggregates and the binder (Iucolano *et al.*, 2016). The effects may vary with respect to the quantity and type of plastic used. If sand is only partially replaced, the formulations are still able to reach the minimum strength values for both structural mortars and lightweight concretes (Saikia and de Brito, 2012). On the other hand, it strongly improves the post-fracture behaviour of mortars and concretes, increasing ductility, reducing micro-crack propa-

tossici in caso di incendio incrementa proporzionalmente alla quantità di inerte utilizzato (Ibrahim *et al.*, 2020).

Metodologia della ricerca

Rispetto al vasto panorama di sperimentazioni esistenti la ricerca si distingue per l'attenzione dedicata, nelle fasi iniziali del progetto, al processo di sviluppo industriale degli aggregati riciclati e alla loro ottimizzazione per il raggiungimento di una granulometria adeguata come aggregato fine per malte e massetti. Si intende riflettere sui passi necessari per creare una filiera continuativa di aggregati riciclati che dovrà essere sostenuta da una domanda di prodotti per l'edilizia da proporre sul mercato.

Per i tecnopolimeri, le sfide principali sono state la selezione di composti sicuri e lavorabili e la riduzione alla dimensione appropriata. Per il GTR, la natura idrofobica della gomma non trattata, che crea un debole legame interfacciale con il legante, ha richiesto l'ottimizzazione di trattamenti superficiali.

La metodologia adottata per la definizione dei prodotti da costruzione è quella di sostituire percentuali crescenti di inerti naturali con aggregati polimerici riciclati. Sono state individuate due strategie:

- la sostituzione degli inerti naturali nelle formulazioni di prodotti già commercializzati (Tab. 1);
- la progettazione di nuovi prodotti a partire dalle formulazioni standard da normativa.

Nella sostituzione nelle formulazioni esistenti, la prima difficoltà riscontrata è stata la definizione della corretta curva granulometrica e il raggiungimento delle densità minime con la sostituzione di inerti riciclati caratterizzati da peso e volume sensibilmente differenti da quelli naturali.

gation (Fantilli *et al.*, 2018; Araujo-Morera *et al.*, 2021; Adesina and Das, 2021) and preventing large material cracks (Turatsinze *et al.*, 2005).

Cement-based concretes and mortars incorporating rubber or plastic particles, when subjected to seismic actions, can dissipate large amounts of energy and potentially withstand longer (Marzouk *et al.*, 2007); this is also due to the reduction of the building's own weight, which affects the impact of shocks (Ibrahim *et al.*, 2020). The reuse of waste plastics in cement-based products is also a good approach to reduce the abundance of plastic-based solid waste in the environment or in landfills (Gu and Ozbakkaloglu, 2016). Studies have shown that the integration of these aggregates has a positive influence on the reduction of thermal conductivity and sound absorption of these materials (Araujo-Morera *et*

al., 2021; Xuemiao *et al.*, 2020). The release of toxic fumes in case of fire is increased by the amount of aggregate used (Ibrahim *et al.*, 2020).

Research methodology

Compared to the vast panorama of existing experiments, the research stands out for the attention devoted in the initial stages of the project to the industrial development process of recycled aggregates and their optimisation to achieve a suitable grain size as a fine aggregate for mortar and screeds. It is intended to reflect on the steps needed to create a continuous supply chain of recycled aggregates that will have to be supported by a demand for building products to be offered in the market. For engineering polymers, the main challenges were the selection of safe and processable compounds and the reduction to the appropriate size. For

Tab. 01 | Formulazioni di prodotti di mercato selezionate per la fase sperimentale
Market product formulations selected for the experimental phase

PRODOTTO	COMPOSIZIONE	DENSITÀ DELLA MALTA FRESCA	DENSITÀ DELLA MALTA INDURITA	RESISTENZA A COMPRESIONE	RESISTENZA A FLESSIONE
MPD20	Legante: 16% Aggregati: 84%	~1,8 kg/dm ³	~1,6 kg/dm ³	> 5 N/mm ²	> 2 N/mm ²
MASSETTO TRADIZIONALE	Legante: 14% Aggregati: 86%	~2,2 kg/dm ³	~2,0 kg/dm ³	> 16 N/mm ²	> 3 N/mm ²

Tab. 01

È stato quindi necessario ottimizzare i componenti riciclati per ottenere la dimensione adeguata delle particelle, che per le malte è compresa tra 0,5 e 2 mm mentre nei massetti tra 2 e 4 mm.

Successivamente, lo sviluppo del mix design per i prodotti commerciali si è concentrato sulla lavorabilità del prodotto e sul raggiungimento delle prestazioni meccaniche minime.

Si è operato con una sostituzione incrementale dal 5% al 60% del volume degli inerti naturali con gli aggregati riciclati ottimizzati. È stata inoltre analizzata la reazione al fuoco della formulazione certificabile.

Le nuove formulazioni sono state sviluppate secondo la norma per le malte standard UNI EN 196-1 (2005), in cui sono state operate sostituzioni progressive degli inerti allo scopo di raggiungere le massime potenzialità meccaniche.

Caratterizzazione degli aggregati termoplastici

Il trattamento meccanico degli sfridi termoplastici è economicamente sostenibile per prodotti macinati da 8 a 12 mm. La riduzione dimensionale per ottenere frazioni di prodotto più piccole, ad esempio 0,5-2,0 mm, è impegnativa. Il processo genera attrito e aumento della temperatura del materiale con conseguente fusione o degrado del prodotto (Araujo-Morera *et al.*, 2021). Per selezionare i polimeri idonei è stata applicata un'analisi Calorimetrica Differenziale a Scansione (CDS), che mostra tramite un termogramma le trasformazioni fasiche che interessano il materiale all'aumento della temperatura.

Due campioni di tecnopolimeri sono risultati stabili (Tab. 2):

GTR, the hydrophobic nature of the untreated rubber, which creates a weak interfacial bond with the binder, required the optimisation of surface treatments.

The methodology adopted for the definition of construction products is to replace increasing percentages of natural aggregates with recycled polymeric aggregates. Two streams of work have been identified:

- The replacement of natural aggregates in the formulations of products already on the market (Tab. 1);
- The design of new products from standard formulations in accordance with regulations.

When replacing existing formulations, the first difficulty encountered was defining the correct particle size curve and achieving minimum densities by substituting recycled aggregates with weights and volumes significantly dif-

ferent from the natural ones. It was, therefore, necessary to optimise the recycled components in order to achieve the appropriate particle size, which for mortars is between 0.5 and 2 mm and between 2 and 4 mm for screeds.

Subsequently, the development of the mix design for commercial products focused on the workability of the product and the achievement of minimum mechanical performance.

An incremental replacement of 5% to 60% of the volume of natural aggregates with optimised recycled aggregates was carried out. The reaction to fire of the certifiable formulation was analysed. The new formulations were developed in accordance with the standard mortar regulation UNI EN 196-1 (2005), in which progressive substitutions of aggregates were made in order to achieve the maximum mechanical potential.

- PW1, una miscela di PBT (polibutilene tereftalato) e ABS (acrilonitrile butadiene stirene);
- PW2, una miscela di PA (poliammide) e PP (polipropilene), con fibra di vetro.

Per raggiungere una dimensione delle particelle appropriata sono necessarie tre fasi di taglio meccanico: triturazione, molatura e vagliatura.

Per il campione PW1 sono stati necessari tre cicli di molatura, per il campione PW2 soltanto uno perché il contenuto di fibra di vetro ha facilitato l'azione di taglio delle lame rotanti. Questo secondo campione è stato selezionato per la preparazione di malte e massetti. La fase di vagliatura consente la separazione granulometrica delle frazioni di prodotto: particelle maggiori di 3 mm, da 0,5 a 2 mm e minori di 0,4 mm. Un processo di vibrovaglio a tre fasi ha affinato il prodotto per una specifica gamma dimensionale: particelle più grandi di 2 mm, particelle da 1 e 2 mm, e polvere inferiore a 1 mm.

Caratterizzazione degli aggregati in gomma riciclati

Il primo approccio consiste nell'adattare particelle di gomma tritata e riciclata (GTR) già in commercio, per la formulazione di malte da costruzione e massetti civili a matrice cementizia. La superficie idrofobica delle particelle deve essere modificata prima dell'utilizzo in materiali a base cemento, di natura idrofila. Il trattamento chimico delle particelle di gomma altera le proprietà superficiali e facilita la fase successiva di utilizzo quale "aggregato alternativo". La funzionalizzazione delle parti-

Characterisation of thermoplastic aggregates

Mechanical treatment of thermoplastic waste is economically viable for products ground to 8 to 12 mm. Size reduction to obtain smaller product fractions – for example, 0.5-2.0 mm – is challenging. The process generates friction and an increase in material temperature resulting in melting or degradation of the product (Araujo-Morera *et al.*, 2021). In order to select suitable polymers, a Differential Scanning Calorimetry (CDS) analysis was applied, which shows by means of a thermogram the phasic transformations affecting the material as the temperature increases.

Two technopolymer samples were stable (Tab. 2):

1. PW1, a mixture of PBT (polybutylene terephthalate) and ABS (acrylonitrile butadiene styrene);

2. PW2, a mixture of PA (polyamide) and PP (polypropylene), with glass fibre.

To achieve an appropriate particle size, three mechanical cutting steps are required: shredding, grinding and screening. Three grinding cycles were required for sample PW1, while sample PW2 required only one because the glass fibre content facilitated the cutting action of the rotary blades. This second sample was selected for the preparation of mortars and screeds. The screening stage enables the particle size separation of product fractions: particles larger than 3 mm, 0.5 to 2 mm, and smaller than 0.4 mm. A three-stage vibrating screening process refined the product for a specific size range: particles larger than 2 mm, particles of 1 and 2 mm, and powder smaller than 1 mm.

COMPOSIZIONE	ID	DIMENSIONE SETACCIO	ASPETTO	INTERVALLO DIMENSIONALE	# CICLI	OBIETTIVO RAGGIUNTO
PW1	1A	10mm	granulare	8-10 mm	1	si
	1B	5mm	granulare	3-5 mm	1	si
	1C	2mm	granulare /polveroso	0,5 - 2,5 mm	3	si
PW2	2A	10mm	granulare	8-10 mm	1	si
	2B	5mm	granulare	3-5 mm	1	si
	2C	2mm	granulare /polveroso	0,5 - 3 mm	1	si

Tab. 02

celle GTR include il trattamento con un agente reattivo utile a introdurre gruppi polari sulla superficie delle particelle di gomma tritate. La modifica superficiale aumenta l'adesione tra gomma e il legante e la forza di adesione interfacciale a causa della maggiore polarità del GTR funzionalizzato. Sono state testate tre diverse procedure: modifica della superficie con Silani; ossidazione superficiale con Perossido di Idrogeno ed ossidazione superficiale con Ipoclorito di Sodio. Per valutare il livello di attivazione delle superfici è stato applicato il Dyne test. Per la scelta del tipo di trattamento è considerato più efficiente quello con Silani in quanto il processo non prevede la fase di neutralizzazione, lavaggio e asciugatura, a differenza degli altri trattamenti.

Il secondo approccio è consistito nella creazione di un prodotto composito gomma-polimero per ottenere una migliore efficienza di compatibilità tra i materiali riciclati e il cemento e potenzialmente anche una riduzione dei costi totali, integrando i due inerti in un unico prodotto.

Tre diverse composizioni sono state testate in un estrusore: PW con 5% GTR. PW con 15% GTR. PW con 30% GTR. Le composizioni contenenti il 5% e il 15% di GTR sono state lavorate senza problemi. Il composto contenente il 30% di GTR, ha creato

invece instabilità alla linea dell'estrusione e il processo è stato di difficile esecuzione.

La dimensione del materiale composto è determinata dalle capacità di taglio del pellettizzatore, in questo caso la dimensione minima ottenibile è di 2-3 mm di lunghezza e 1-5 mm di diametro. I tentativi di riduzione delle dimensioni, svolti nelle sedi di produzione dei tecnopolimeri e del GTR, hanno dimostrato che, a causa dell'azione meccanica, la gomma raggiunge la sua tipica temperatura di fusione, bloccando il processo. Il prodotto composito non può pertanto raggiungere la dimensione ottimale per poter essere utilizzato quale aggregato riciclato in formulati di malte da costruzione e massetti civili.

Integrazione di inerti polimerici in malte e massetti commerciali

Le attività di ricerca sono iniziate alterando la formulazione di base di una malta premiscelata per l'elevazione delle murature e di un massetto per uso civile, già in commercio, in cui gli inerti naturali come carbonati di calcio e sabbie silicee sono stati via via sostituiti con gli aggregati riciclati.

Per raggiungere le prestazioni meccaniche minime, requisiti

Characterisation of recycled rubber aggregates

The first approach is to adapt commercially available crushed and recycled rubber (GTR) particles for use in the formulation of cement-based construction mortars and civil screeds. The hydrophobic surface of the particles must be modified before use in cement-based materials which are hydrophilic in nature. The chemical treatment of the rubber particles alters the surface properties and facilitates their subsequent use as "alternative aggregate". Functionalisation of GTR particles includes treatment with a reactive agent to introduce polar groups on the surface of the crushed rubber particles. The surface modification increases the adhesion between rubber and binder and the interfacial bond strength due to the increased polarity of the functionalised GTR. Three different procedures

were tested: surface modification with silanes; surface oxidation with hydrogen peroxide, and surface oxidation with sodium hypochlorite.

To assess the level of surface activation, the Dyne test was applied. For the choice of the type of treatment, the one with silanes is considered more efficient because the process does not include the neutralisation, washing and drying phases, unlike the other treatments.

The second approach was to create a rubber-polymer composite product to achieve better compatibility efficiency between recycled materials and cement and potentially also a reduction in total costs by integrating the two aggregates into one product.

Three different compositions were tested in an extruder: PW with 5% GTR, PW with 15% GTR and PW with 30% GTR. The compositions containing 5% and 15% GTR were processed without

any problems. The composition containing 30% GTR, however, created instability at the extrusion line and the process was difficult to perform.

The size of the compound material is determined by the cutting capabilities of the pelletiser, in which case the minimum size obtainable is 2-3 mm in length and 1-5 mm in diameter. Tests carried out at the engineering polymer and GTR production sites have shown that, due to mechanical action, the rubber reaches its typical melting temperature, blocking the process. The composite product, therefore, cannot reach the optimum size for use as a recycled aggregate in construction mortar and civil screed formulations.

Integration of polymeric aggregates in commercial mortars and screeds

The research activities started by altering the basic formulation of a pre-

mixed mortar for masonry elevation and of a screed for civil use already in the market, in which the natural aggregates such as calcium carbonates and silicate sands were gradually replaced with recycled aggregates.

In order to achieve the minimum mechanical performance required by the specific standards, a suitable grain size curve of the mixture components was designed. For both mortars and screeds, several tests were carried out, modifying both the percentages of recycled aggregates and their types. Three types of mixes were tested: with untreated and treated GTR; with technopolymers, and with both aggregates. For each formulation developed in the laboratory, a series of rapid tests were carried out to compare the experimental products and define the physical, mechanical and application performance parameters. For both mortars

richiesti dalle norme specifiche, è stata progettata un'adeguata curva granulometrica dei componenti della miscela. Sia per le malte che per i massetti, sono stati effettuati diversi provini modificando sia le percentuali di aggregati riciclati che la loro tipologia. Sono stati testati tre tipi di miscela: con GTR non trattato e trattato; con tecnopolimeri e con entrambi gli aggregati.

Per ogni formulazione sviluppata in laboratorio è stata eseguita una serie di test rapidi utili per confrontare i prodotti sperimentali e definire i parametri prestazionali fisici, meccanici e applicativi.

Sia per le malte che per i massetti, per ciascuno dei tipi di inerte e per il loro mix sono state scelte le migliori formulazioni, indicate in grassetto nella tabella 3, poi testate rispettivamente, secondo la norma di riferimento EN 998-2, per le prime e la EN 13813 per i secondi.

Per la fase di produzione, le formulazioni di base delle malte sono state ottimizzate per migliorare la lavorabilità dell'impasto, la resistenza meccanica e per ridurre le quantità di acqua necessarie. Delle formulazioni sviluppate in laboratorio, un piccolo lotto è stato prodotto in una linea industriale e utilizzato nelle prove di implementazione meccanica. I prodotti sono stati applicati su diversi tipi di substrati (pareti in mattoni e blocchi). Le malte sono state mescolate sia a mano che con un trapano elettrico a basso numero di giri. Con le prime prove l'installatore è riuscito ad ottenere uno strato di oltre 1 cm e un altro di oltre 2 cm. La migliore resistenza meccanica è stata ottenuta con la formulazione in cui la sostituzione ha incluso i soli tecnopolimeri, Malta P in figura 5, che è adeguata per una certificazione di categoria M15, e insieme alla malta GP (categoria M10) sono adeguate per usi strutturali anche in zona a rischio sismico.

and screeds, the chosen formulas with each type of aggregate, highlighted in bold in table 3, were then tested according to the reference standard EN 998-2, and EN 13813 respectively.

For the production phase, the basic mortar formulations were optimised to improve mix workability and mechanical strength and to reduce the amount of water required. Of the formulations developed in the laboratory, a small batch was produced on an industrial line and used in mechanical implementation tests. The products were applied to different types of substrates (brick and block walls). The mortars were mixed both by hand and with an electric drill at low speed. In the initial tests, the installer managed to obtain a layer of more than 1 cm and another of more than 2 cm. The best mechanical performances were achieved with Malta P which only in-

cludes techno-polymers, see Figure 4, which is compliant for category M15, and together with Malta GP (category M10), is also suitable for structural uses in seismic areas.

The same material testing procedure was carried out to verify the performance of cementitious screeds. The production test was carried out using a line suitable for small production batches. This production line also serves to verify that the materials developed in the laboratory are suitable for subsequent large-scale industrial production. The screeds were tested with application thicknesses between 4 and 8 cm, thicknesses that simulate the typical application on site. The production test confirmed the parameters and characteristics already achieved at laboratory level (Tab. 4).

With compressive strengths of more than 5 N/mm² and 10 N/mm², POLY-

La stessa procedura di prova dei materiali è stata eseguita per verificare le prestazioni dei massetti cementizi. Il test di produzione è stato effettuato utilizzando una linea adatta a piccoli lotti di produzione. Questa linea di produzione serve anche a verificare che i materiali sviluppati in laboratorio siano idonei alle successive e massicce produzioni industriali. I massetti sono stati testati con spessori applicativi compresi tra 4 e 8 cm, spessori che simulano l'applicazione tipica in cantiere. Il test di produzione ha confermato i parametri e le caratteristiche già raggiunti a livello di laboratorio (Tab. 4).

Con una resistenza a compressione superiore a 5 N/mm² e 10 N/mm², le malte POLYWORK risultano adatte per pareti esterne ed interne, e per applicazioni strutturali anche in zone sismiche. Tra le formulazioni dei massetti, solo il massetto P, quello composto con tecnopolimeri, ha soddisfatto tutti i requisiti minimi per ottenere una eventuale marcatura CE, ma l'aggregato naturale è stato completamente sostituito con quello artificiale.

Si tratta di un prodotto adatto per la preparazione di sottofondi per piastrelle, cotto, pietra naturale, parquet, materiali resilienti e sistemi di pavimentazione decorativa. Sulla migliore formulazione, sono stati eseguiti ulteriori test di reazione al fuoco. La classe di reazione al fuoco è determinata con l'analisi del comportamento a combustione utilizzando una sorgente di calore radiante (EN ISO 9239-1) e mediante il test della sorgente a fiamma singola (EN ISO 11925-2).

Sviluppo di nuovi prodotti

In questa fase sono state sviluppate malte standard a base cementizia, non ottimizzate per il mercato. L'esperimento è finalizzato a valutare quale livello di prestazioni meccaniche potrebbe

Development of new products

At this stage, standard cement-based mortars have been developed, which are not optimised for the market. The aim of the experiment is to evaluate what level of mechanical performance could be achieved by the integration of engineering polymers and GTR, without considering the production, workability and cost aspects of the products. The experimental investigation, concerning 14 different mortars, was carried out according to EN 196-1. Two different binders were used (Tab. 5): a first series of specimens contained traditional Portland cement with a strength of more than 42.5 MPa at 28 days (type II / A-LL 42.5 R); Portland cement (40% by mass) and sulphoaluminate clinker (60% by mass) were used for the second series. Standardised silica sand with a maximum size of no more than 2 mm was used

Tab. 03 | Mix design per la sostituzione degli inerti naturali nei campioni di malta e massetto
 Mix design for replacement of natural aggregates in mortar and screed samples

|Tab. 03

CAMPIONE	LEGANTE CEMENTIZIO	AQUA (%)	AGGREGATI NATURALI (%)	AGGREGATI RICICLATI (quali)	AGGREGATI RICICLATI (%)
Malta G_01	14%	24%	81%	Sabbia silicea Carbonato di calcio Gomma non trattata (0.5-2.0 mm)	5%
Malta G_02	27%	24%	65%		8%
Malta G_03	30%	24%	62%		8%
Malta G_04	30%	25%	55%		15%
Malta G_05	30%	26%	50%		20%
Malta G1_01	30%	25%	60%	Sabbia silicea Carbonato di calcio Gomma trattata con Silani	10%
Malta G1_02	30%	25%	55%		15%
Malta P_01	14%	24%	81%	Sabbia silicea Carbonato di calcio Tecno-polimeri PW1	5%
Malta P_02	22%	27%	73%		5%
Malta P_03	24%	27%	70%		6%
Malta P_04	24%	28%	66%		10%
Malta P_05	27%	28%	63%		10%
Malta P_06	30%	28%	55%		15%
Malta P_07	30%	28%	50%		20%
Malta GP_01	14%	22%	81%	Sabbia silicea Carbonato di calcio Gomma non trattata 0.5-2.0 mm Tecno-polimeri PW1	5%
Malta GP_02	25%	23%	65%		10%
Malta GP_03	30%	23%	60%		10%
Malta GP_04	30%	23%	55%		15%
Massetto G_01	16%	22%	49%	Gomma non trattata (0.5-2.0 mm) Gomma non trattata (2.0-4.0 mm)	35%
Massetto G_02	35%	23%	10%		45%
Massetto G_03	45%	23%	0%		55%
Massetto P_01	16%	18%	50%	Tecno-polimeri PW1 Tecno-polimeri PW2	34%
Massetto P_02	30%	20%	35%		35%
Massetto P_03	35%	20%	15%		50%
Massetto P_04	40%	22%	10%		50%
Massetto P_05	45%	22%	0%		55%
Massetto P_06	40%	22%	0%		60%
Massetto GP_01	40%	22%	10%	Tecno-polimeri PW1 Tecno-polimeri PW2 Gomma trattata con silani	50%
Massetto GP_02	45%	22%	0%		55%

as aggregate for the standard cement mortars.

GTR from 0.5 to 2.5 mm with treated and untreated surfaces and the engineering polymers PW1 and PW2 were used.

The particles were sieved to obtain the same size distribution as the silica sand.

Figure 1 shows the test results for the mechanical performance of the new standard mortars.

The results of the experiments on standard mortars modified with the integration of recycled aggregates confirm the literature results such as the reduction of density and of compressions

and flexural strength and the improvement of fracture resistance. Polymer aggregates can significantly increase the ductility of cement mortars. If sulphoaluminate cements are used instead

essere raggiunto dall'integrazione di tecnopolimeri e GTR, senza considerare gli aspetti di produzione, lavorabilità e costo dei prodotti. L'indagine sperimentale, relativa a 14 differenti malte, è stata condotta secondo la norma EN 196-1.

Sono stati utilizzati due diversi leganti (Tab. 5): una prima serie di provini contiene cemento Portland tradizionale, con resistenza superiore a 42,5 MPa a 28 giorni (tipo II / A-LL 42,5 R); per la seconda serie sono stati utilizzati cemento Portland (40% in massa) e clinker Solfo-Alluminato (60% in massa). Come aggregato delle malte cementizie standard è stata adottata una sabbia silicea normalizzata, di dimensione massima non superiore a 2 mm.

Sono stati utilizzati GTR da 0,5 a 2,5 mm con superfici trattate e non trattate e i tecnopolimeri PW1 e PW2. Le particelle sono state setacciate per ottenere la stessa distribuzione dimensionale della sabbia silicea.

In figura 1 sono presenti i risultati dei test per le prestazioni meccaniche delle nuove malte standard.

I risultati degli esperimenti su malte di tipo standard modificate con l'integrazione di aggregati riciclati confermano i risultati di letteratura come la riduzione della densità e delle resistenze a

compressione e flessione e il miglioramento della resistenza a frattura. Gli aggregati polimerici possono aumentare notevolmente la duttilità delle malte cementizie. Con l'utilizzo di cementi solfo-alluminati la resistenza delle malte non viene quasi compromessa. Nella maggior parte dei casi, il trattamento superficiale del GTR non modifica sostanzialmente le proprietà meccaniche delle malte, ad eccezione delle malte contenenti cemento Portland e gomma trattata con silano, in cui la resistenza a frattura è paragonabile a miscele che includono fibre di polipropilene.

Questo tipo di malte sono quindi indicate per rinforzare le strutture in cemento armato esistenti poiché i prodotti hanno dimostrato una grande capacità di assorbire energia meccanica a fronte di una densità ridotta.

Discussione dei risultati nel quadro di un approccio circolare, conclusioni e sviluppi futuri

La ricerca è riuscita ad applicare un approccio circolare nella produzione di 3 diverse formulazioni di malte da costruzione, e un massetto di sottofondo di tipo civile, certificabili con marchiatura CE anche adeguate a costruzioni in area sismica. Le proprietà delle nuove malte stan-

PROPRIETÀ	MALTA G		MALTA P		MALTA GP	
Densità della malta fresca kg/m ³ EN 1015-6	1730		1730		1730	
Densità della malta indurita kg/m ³ EN 1015-10	1100		1335		1290	
Resistenza a flessione N/mm ² EN 998-2	2.85		4.00		3.05	
	2.70		4.20		3.00	
	2.70		4.00		3.00	
	2.7		4.1		3.0	
Resistenza a compressione N/mm ² EN 998-2	6.85	4.75	16.55	15.80	10.05	10.90
	6.80	5.90	17.45	17.00	9.85	9.95
	5.85	5.65	13.80	16.45	10.45	9.00
	5.9		16.1		10.0	
	Categoria M5		Categoria M15		Categoria M10	
PROPRIETÀ	MASSETTO G		MASSETTO P		MASSETTO GP	
Resistenza a flessione N/mm ² EN 13892-2	1.00		3.45		1.65	
	1.05		3.40		2.00	
	1.00		3.45		2.00	
	1.0 - Categoria F1		4.1 - Categoria F3		1.9 - Categoria F1	
Resistenza a compressione N/mm ² EN 13892-2	1.40	1.75	15.90	15.95	4.05	4.35
	1.50	1.85	15.95	16.90	5.30	4.00
	1.80	1.50	16.45	15.20	4.05	4.00
	1.6		16.0 - Categoria C16		4.3	
Reazione al fuoco EN ISO 13501-1	-		Class C _{fi} -s1		-	

| Tab.04

CAMPIONI	LEGANTE e ACQUA	AGGREGATI	FIBRE
P-1	Cemento Portland (580 kg/m ³)	Sabbia silicea (1700 kg/m ³)	-
P-2		Sabbia silicea (1140 kg/m ³) + Gomma non trattata (150 kg/m ³)	-
P-3		Sabbia silicea (1140 kg/m ³) + Gomma trattata chimicamente (150 kg/m ³)	-
P-4		Sabbia silicea (1140 kg/m ³) + Gomma trattata con plasma (150 kg/m ³)	-
P-5	Acqua (kg/m ³)	Sabbia silicea (1700 kg/m ³)	Polipropilene (1% in vol.)
P-6	Acqua (kg/m ³)	Sabbia silicea (1140 kg/m ³) + PW1 (200 kg/m ³)	-
P-7		Sabbia silicea (1140 kg/m ³) + PW2 (210 kg/m ³)	-
SA-1		Sabbia silicea (1700 kg/m ³)	-
SA-2	Cemento solfo-alluminato (580 kg/m ³)	Sabbia silicea (1140 kg/m ³) + Untreated Rubber (150 kg/m ³)	-
SA-3		Sabbia silicea (1140 kg/m ³) + Gomma trattata chimicamente (150 kg/m ³)	-
SA-4		Sabbia silicea (1140 kg/m ³) + Gomma trattata con plasma (150 kg/m ³)	-
SA-5		Acqua (kg/m ³)	Sabbia silicea (1700 kg/m ³)
SA-6	Acqua (kg/m ³)	Sabbia silicea (1140 kg/m ³) + PW1 (200 kg/m ³)	-
SA-7		Sabbia silicea (1140 kg/m ³) + PW2 (210 kg/m ³)	-

standard progettate hanno confermato i risultati di letteratura e aprono nuove opportunità di sviluppo di materiali da ripristino strutturale adeguati ad aree a rischio sismico.

Una rassegna di studi sugli impatti ambientali degli aggregati riciclati del calcestruzzo derivanti dal trattamento di rifiuti da costruzione e demolizione (C&D) ha riconosciuto tra i fattori maggiormente influenti il trasporto del materiale riciclato nel

sito di produzione del calcestruzzo, la maggiore quantità di cemento necessaria nelle formulazioni per garantire le prestazioni meccaniche, l'energia incorporata necessaria alla produzione dell'aggregato riciclato rispetto all'estrazione di quello naturale. La sostituzione solo parziale dell'aggregato naturale risulterebbe un buon compromesso sia dal punto vista ambientale che economico (Ghisellini *et al.*, 2018).

of Portland cement, the strength of the mortars is hardly affected.

In most cases, the surface treatment of GTR does not substantially change the mechanical properties of the mortars, with the exception of mortars containing Portland cement and silane-treated rubber, where the fracture resistance is comparable to mixtures that include polypropylene fibres.

This type of mortar is, therefore, suitable for reinforcing existing reinforced concrete structures as the products have demonstrated a high capacity to absorb mechanical energy at a low density.

Discussion of results in the context of a circular approach, conclusions and further research

The research applied a circular approach to the production of three different construction mortar formula-

tions and of a civil substrate screed, all suitable for CE certification.

Performances of new standard mortars confirm the literature results and open up new opportunities for the development of construction products which, as well as commercial mortars and screed, demonstrated that they were adequate for building in seismic areas. Among the most influential factors for the environmental impacts of recycled concrete aggregates, a review of studies on construction and demolition (C&D) waste treatment identified the transport of the recycled material to the concrete production site, the higher amount of cement required in the formulations to ensure mechanical performance and the embodied energy needed to produce the recycled aggregate compared to the extraction of natural aggregate. Replacing only part of the natural aggregate is considered a

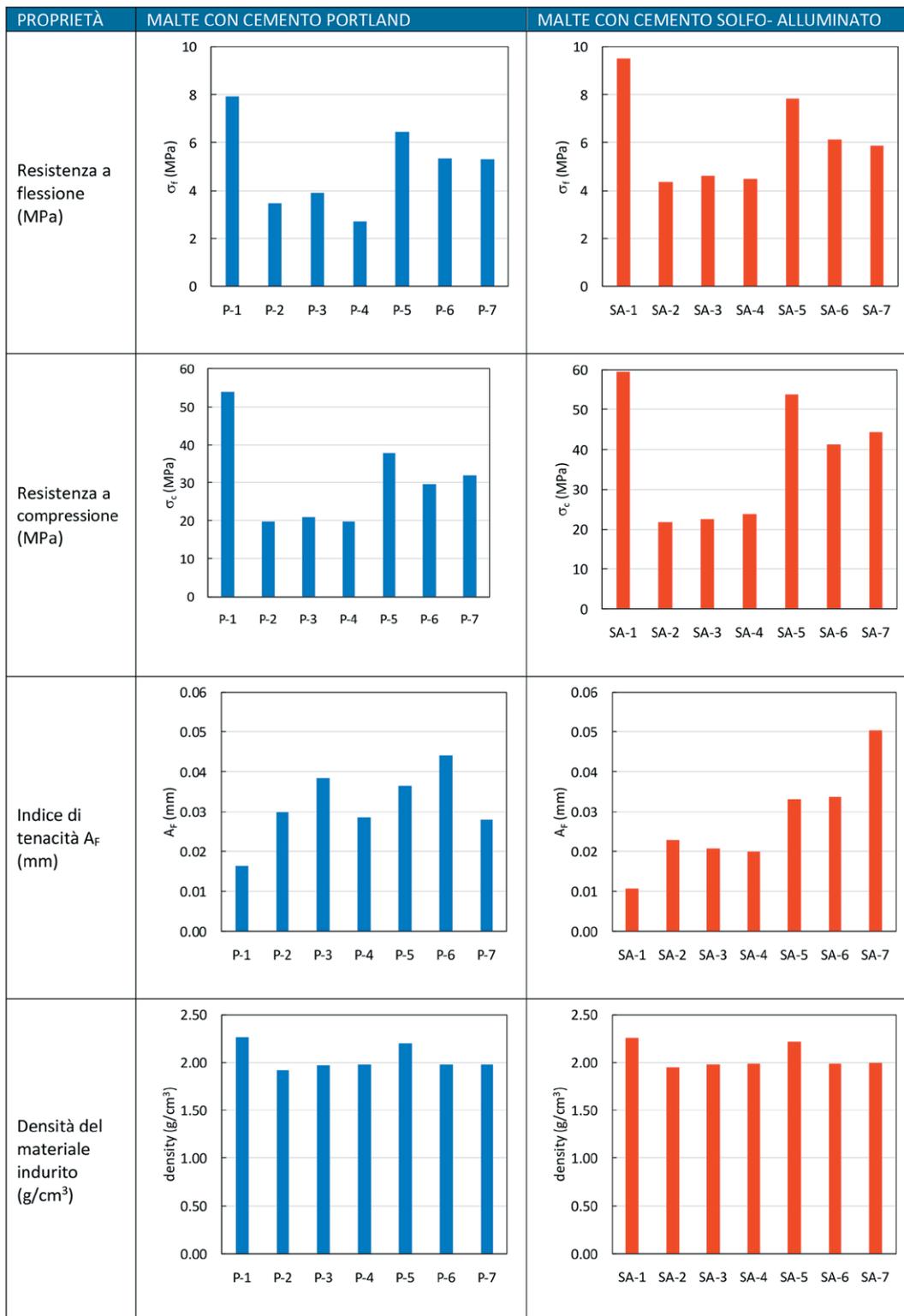
good compromise both from an environmental and economic point of view (Ghisellini *et al.*, 2018).

To frame this concept for the type of aggregates produced in the presented experiment, several factors should be considered: the impact of the energy needed to process the polymeric waste could be higher than that required for the recycling of C&D waste since more phases are needed to obtain the suitable granulometry; transport of GTR particles in this specific case is particularly high since the project partner is located in Israel, but in normal situations a local producer would be chosen, while in the case of thermoplastic waste, the recycling plant is located about 200 km away from the mortar and screed production company. The increase in the amount of cement required to achieve the mechanical strengths of the products in

this research confirms what has been reported in the literature: in traditional formulations the content is about 16% in mortars and 25% in screeds, while in formulations with recycled aggregate the cement content reaches up to 30% and up to 45% respectively.

The cradle-to-cradle LCA model is preferable for assessing the environmental impact of buildings according to circular economy (CE) principles and for proper end-of-life management of the building (Ghisellini *et al.*, 2018).

Most LCA studies of C&D waste have focused on assessing the end of life of the product at the moment when the waste is already generated, evaluating the impacts of landfilling versus recycling. On the other hand, it was emphasised that preventing the creation of C&D waste can effectively reduce the amount of waste by 57% compared



to a case where this scenario was not foreseen in the design phase (Llatas *et al.*, 2021). When the products developed by this research reached the end of life, they could not be separated from the building elements in which

they are installed and they could only be used to produce new recycled aggregates for concrete or road decks. In order to evaluate the actual reduction of the environmental impact of mortars and screeds with recycled

polymeric aggregates, it will be necessary to carry out an in-depth LCA analysis comparing the extraction and processing phases of a natural aggregate against those of collection and processing to produce recycled ones,

and the latter against the environmental impact of landfilling the same waste in a non-recycling condition. From an economic feasibility perspective, previous research showed that site-specific economic factors such as

Volendo caratterizzare questo ragionamento rispetto al tipo di aggregati prodotti per questa sperimentazione, l'impatto dell'energia necessaria alla lavorazione dei rifiuti polimerici potrebbe essere maggiore rispetto al riciclo di rifiuti C&D dal momento che più passaggi sono necessari per ottenere la granulometria adatta, il tema del trasporto nel caso specifico è particolarmente elevato per il GTR, dal momento che il partner del progetto è collocato in Israele, ma in situazioni normali si sceglierebbe un produttore locale, mentre nel caso dei rifiuti termoplastici si trova a circa 200 km di distanza dall'azienda di produzione delle malte e massetti. L'incremento della quantità di cemento necessario per raggiungere le resistenze dei prodotti di questa ricerca conferma quanto riportato in letteratura: nelle formulazioni tradizionali il contenuto è di circa il 16% nelle malte e il 25% nei massetti, mentre nelle formulazioni con l'aggregato riciclato il contenuto di cemento arriva fino al 30% e fino al 45% rispettivamente.

Il modello LCA dalla culla alla culla risulta preferibile per la valutazione dell'impatto ambientale degli edifici secondo i principi dell'economia circolare (EC) e per una corretta gestione del fine vita dell'edificio (Ghisellini *et al.*, 2018). La maggior parte degli studi LCA relativi ai rifiuti da C&D si sono concentrati sul valutare il fine vita del prodotto nel momento in cui il rifiuto è già generato, valutando gli impatti del conferimento in discarica rispetto al riciclo. È stato invece sottolineato come il prevenire la creazione di rifiuti da C&D possa effettivamente ridurre la quantità di rifiuti del 57% rispetto a un caso in cui questo scenario non sia stato previsto in sede progettuale (Llatas *et al.*, 2021). Nel caso dell'impiego dei prodotti sviluppati da questa ricerca, questi non saranno separabili dagli elementi edilizi in cui sono

the cost of energy, the possibility of generating economies of scale and the productivity of the plant have a direct influence (Ghisellini *et al.*, 2018). In addition, it is necessary to consider the payback time of the investments necessary for the technological upgrading of the plants to produce the RA. This factor is particularly evident for the proposed experiment since new equipment and processes have been specifically developed. The next steps of the research will also need to assess the economic impact of the new value chains and consequently the jobs generated. As outlined in COM 98 (2020), secondary raw materials are unlikely to compete with primary raw materials in terms of performance, availability and cost. However, the implementation of mandatory national policies, such as GPP rules, are already creating demand for these products in the

market. National policies should also favour the market for recycled over natural aggregates: e.g. through quality certification schemes for recycled materials, increased taxation on natural aggregates versus more competitive prices for recycled aggregates (Di Maria *et al.*, 2018).

Project technical data

Title: POLYWORK. Multifunctional cementitious mortar with polymeric waste

Location: Italy and Israel.

Funding: Manunet 2018 (Horizon 2020); Regione Piemonte's POR FESR 201472020 Axis 1, Action I. 1b.1.2 Manunet III 2018; Israelian financial agency.

Duration: 26 February 2019 -30 September 2020.

Companies: Vimark srl, Tyrec ltd, Manifattura Russo Filippo, Politecnico

installati e il fine vita consisterà nella produzione di nuovi inerti riciclati per la produzione di calcestruzzi o sottofondi stradali. Per valutare quindi l'effettiva riduzione dell'impatto ambientale delle malte e massetti con inerte polimerico riciclato sarà necessario svolgere un'analisi LCA approfondita che possa mettere a confronto le fasi di estrazione e lavorazione di un inerte naturale contro quelle di raccolta e lavorazione per produrre quelli riciclati e queste ultime rispetto all'impatto ambientale del conferimento in discarica degli stessi rifiuti in una condizione di non riciclo.

Dal punto di vista della fattibilità economica le ricerche pregresse hanno dimostrato l'influenza diretta di fattori economici caratteristici del sito quali il costo dell'energia, la possibilità di generare economie di scala e la produttività dell'impianto stesso (Ghisellini *et al.*, 2018). Inoltre, è necessario considerare il tempo di ritorno degli investimenti necessari per l'aggiornamento tecnologico degli impianti per la produzione dei RCA. Soprattutto questo fattore è particolarmente evidente per l'esperienza proposta dal momento che nuovi macchinari e processi sono stati appositamente sviluppati. Negli sviluppi della ricerca sarà interessante valutare anche l'impatto economico delle nuove filiere produttive necessarie e di conseguenza i posti di lavoro generati.

Come sottolineato nella COM2020/98, le materie prime seconde difficilmente competono con quelle primarie per prestazioni, disponibilità e costo. Tuttavia, l'applicazione di politiche nazionali obbligatorie, come le regole per il GPP, stanno già creando la domanda di questi prodotti sul mercato. Le politiche nazionali dovrebbero inoltre favorire il mercato degli aggregati riciclati rispetto a quelli naturali: ad esempio attraverso sistemi di certi-

di Torino - DISEG

CREDIT AUTHORSHIP CONTRIBUTION STATEMENT

Valentina Marino: conceptualisation, investigation, writing – original draft, writing – review & editing; reasearch objectives, state of the art, methodology, discussion of results in the context of a circular approach, conclusions and further research, visualisation; Marco Dutto: writing – integration of polymeric aggregates in commercial mortars and screeds; Luigi Russo: writing – characterisation of thermoplastic aggregates; Diana Yanover: writing – characterisation of recycled rubber aggregates; Alessandro P. Fantilli: writing – development of new products.

ficazione della qualità dei materiali riciclati, l'incremento della tassazione sugli aggregati naturali rispetto a prezzi maggiormente competitivi per quelli riciclati (Di Maria *et al.*, 2018).

Dati tecnici del progetto

Titolo: POLYWORK. Malta cementizia multifunzionale contenente scarti polimerici.

Ubicazione: Italia e Israele.

Finanziamento: Manunet 2018 all'interno di Horizon 2020; Regione Piemonte nell'ambito del POR FESR 2014/2020 Asse 1, Azione I. 1b.1.2 Bando Manunet III 2018; Agenzia finanziaria israeliana.

Durata: 26 febbraio 2019-30 settembre 2020.

Aziende: Vimark srl – prodotti premiscelati in polvere per l'edilizia; Tyrec – Industria del riciclaggio dei pneumatici; Manifattura Russo Filippo – industria di riciclo di prodotti polimerici; Politecnico di Torino, DISEG – Attività di ricerca.

DICHIARAZIONE SUL CONTRIBUTO DEGLI AUTORI

Valentina Marino: concettualizzazione, indagine, scrittura – bozza originale, scrittura, revisione e editing; obiettivi della ricerca, stato dell'arte, metodologia, discussione dei risultati nel contesto di un approccio circolare, conclusioni e ulteriori ricerche, visualizzazione; Marco Dutto: scrittura – integrazione di aggregati polimerici in malte e massetti commerciali; Luigi Russo: Scrittura – caratterizzazione di aggregati termoplastici; Diana Yanover: scrittura – caratterizzazione di aggregati in gomma riciclata; Alessandro P. Fantilli: scrittura – sviluppo di nuovi prodotti.

REFERENCES

Adesina, A. and Das, S. (2021), "Performance of engineered cementitious composites incorporating crumb rubber as aggregate", *Construction and Building Materials*, Vol. 274, 122033.

Araujo-Morera, J., Verdejo, R., López-Manchado, M.A. and Santana, M.H. (2021), "Sustainable mobility: The route of tires through the circular economy model", *Waste Management*, Vol. 126, pp. 309-322.

D. Lgs. 18/04/2016 n° 50, G.U. 19/04/2016, Codice degli appalti.

Di Maria, A., Eyckmans, J. and Van Acker, K. (2018), "Downcycling versus recycling of construction and demolition waste: Combining LCA and LCC to support sustainable policy making", *Waste Management*, Vol. 75, pp. 3-21.

DM 11 (2017), in G.U. Serie Generale n. 259 del 6 Novembre 2017.

European Commission (2020), "Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the regions, A new circular economy action plan for a cleaner and more competitive Europe COM 98 Final".

Fantilli, A.P., Zegna, A. and Chiaia, B. (2018) "Cement based Mortars with Polymeric Aggregates", Italian Concrete Days, Milano, Italia.

Ghisellini, P., Ripa, M. and Ulgiati, S. (2018), "Exploring environmental and economic costs and benefits of a circular economy approach to the construction and demolition sector. A literature review", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 178, pp. 618-643.

Gu, L. and Ozbakkaloglu, T. (2016), "Use of recycled plastics in concrete: A critical review", *Waste Management*, Vol. 51, pp. 19-42

Ibrahim, A., Bassam, A.T., Rayed, A., Hisham, A., Abdeliazim, M.M. and Abdulaziz A. (2020), "Use of recycled plastic as fine aggregate in cementitious composites: A review", *Construction and Building Materials*, Vol. 253, 119146.

Iucolano, F., Liguori, B., Caputo, D., Colangelo, F. and Cioffi, R., (2013), "Recycled plastic aggregate in mortars composition: Effect on physical and mechanical properties", *Materials and Design*, Vol 52, pp. 916-922.

Llatas, C., Bizcocho, N., Soust-Verdaguer, B., Montes, M.V. and Quiñones, R., (2021), "An LCA-based model for assessing prevention versus non-prevention of construction waste in buildings", *Waste Management*, Vol. 126, pp. 608-622.

Marzouk, O.Y., Dheilily, R. and Queneudec, M. (2007), "Valorization of postconsumer waste plastic in cementitious concrete composites", *Waste Management*, Vol. 27, pp. 310-318.

Milliman, D. and Syvitski, M. (1992), "Geomorphic/Tectonic Control of Sediment Discharge to the Ocean: The Importance of Small Mountainous Rivers", *J. Geology*, Vol. 100, n. 5, pp. 525-544.

Saikia, N. and de Brito, J. (2012), "Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review", *Construction and Building Materials*, Vol 34, pp. 385-401.

Sofi A. (2017), "Effect of waste tire rubber on mechanical and durability properties of concrete – A review", *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 110.

Turatsinze, A., Bonnet, S., and Granju, J.L. (2005), "Mechanical characterisation of cement-based mortar incorporating rubber aggregates from recycled worn tyres", *Building and Environment*, Vol. 40, n. 2, pp. 221-226.

Xuemiao, L., Tung-Chai, L. and Kim Hung, M. (2020), "Functions and impacts of plastic/rubber wastes as eco-friendly aggregate in concrete – A review", *Construction and Building Materials*, Vol. 240, 117869.