

ARTICLE INFO

Received	30 March 2023
Revised	29 April 2023
Accepted	08 May 2023
Published	30 June 2023

L'INNOVAZIONE DI PRODOTTO PER LA TRANSIZIONE ECOLOGICA

Il riciclo del laterizio e del vetro

PRODUCT INNOVATION FOR THE ECOLOGICAL TRANSITION

Brick and glass recycling

Adolfo F. L. Baratta, Jacopo Andreotti, Luca Trulli, Laura Calcagnini

ABSTRACT

Nel contesto tematico dell'uso consapevole e del riciclo delle risorse materiche, il Dipartimento di Architettura dell'Università di Roma Tre ha in corso una linea di ricerca improntata sui temi dell'innovazione ambientale di prodotto. Tale linea è rappresentata da due ricerche applicative che coinvolgono aziende produttrici del settore delle costruzioni. Entrambe le ricerche affrontano il tema della additivazione delle miscele, rispettivamente del laterizio e del calcestruzzo, per la realizzazione di prodotti con prestazioni migliorate. Gli esiti conducono alla prototipazione di due prodotti: un blocco in laterizio, realizzato con scarti che sostituiscono una frazione di argilla con una miscela di fanghi bentonitici e residui metallici, e una miscela di calcestruzzo per massetti, realizzata con scarti e rifiuti in vetro da costruzione e demolizione che sostituiscono gli aggregati naturali.

In the thematic environment of conscious use and material resource recycling, the Department of Architecture of the Roma Tre University is currently conducting a research line focused on environmental product innovation. This line consists of two application studies involving manufacturing companies in the construction sector. Both types of research address the issue of additives in the mix design of bricks and concrete, respectively, to achieve better-performing products. The results led to the prototyping of two products: a brick, made from waste replacing a fraction of clay with a mixture of bentonite sludge and metal residues, and a concrete screed mix, made from construction and demolition glass waste replacing natural aggregates.

KEYWORDS

risorse circolari, innovazione di prodotto, materiali riciclati, laterizio, vetro

circular resources, product innovation, recycled materials, brick, glass

Adolfo F. L. Baratta, Architect and PhD, is an Associate Professor at the Department of Architecture, Roma Tre University (Italy). He conducts teaching and research in technological design, materials and building elements with a specific interest in recovery, recycling and reuse issues. Since 2020 he has been an Italian Ministry of Infrastructure and Transport expert. Mob. +39 338/59.82.598 | E-mail: adolfo.baratta@uniroma3.it

Jacopo Andreotti, PhD Candidate at the Department of Architecture of the Roma Tre University (Italy), researches mainly the recycling of waste in the building sector and the assessment of the life cycle and circularity of building materials, products and artefacts. Mob. +39 348/68.99.971 | E-mail: jacopo.andreotti@uniroma3.it

Luca Trulli, Architect and PhD Candidate at the Department of Architecture of the Roma Tre University (Italy), researches activities mainly on technological innovation issues, especially those related to industrial production processes such as those in the glass sector. Mob. +39 392/78.46.059 | E-mail: luca.trulli@uniroma3.it

Laura Calcagnini, Architect and PhD, is a Researcher at the Department of Architecture, Roma Tre University (Italy). She performs research activities prevalently on energy containment and low-impact design, in addition to other areas of interest such as technological design and flexibility. Mob. +39 340/46.15.045 | E-mail: laura.calcagnini@uniroma3.it



I processi connessi al settore delle costruzioni sono responsabili di oltre un terzo dei rifiuti e delle emissioni prodotte sul pianeta; al settore è inoltre imputabile il consumo di circa la metà delle estrazioni di materia prima per la realizzazione di prodotti ed elementi tecnici (Scalisi and Sposito, 2021). A tale consumo materico non corrisponde un'adeguata strategia di valorizzazione dei prodotti a fine vita: solo il 20-30% dei rifiuti da costruzione e demolizione è destinato a essere riciclato (Munaro and Tavares, 2021). La prospettiva a lungo termine è rappresentata, dunque, da tassi di consumo delle risorse materiche che supereranno i tassi di rigenerazione delle stesse, con conseguenze gravi sulla disponibilità di materiali (Rahla, Mateus and Bragança, 2021). È pertanto necessario cambiare modello di sfruttamento delle risorse considerando, inoltre, che l'andamento demografico mondiale è in costante aumento. In questo contesto il contributo fornito dall'Economia Circolare (Kirchherr, Reike and Hekkert, 2017), che propone un uso consapevole e perpetuo delle risorse, in contrasto con il modello lineare ovvero usa e getta, è riconosciuto a livello europeo in politiche (Domech and Bahn-Walkowiak, 2019) e piani strategici (European Commission, 2020) come approccio per la minimizzazione e la valorizzazione dei rifiuti in grado di agevolare il raggiungimento degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (Ogunmakinde, Egbelakin and Sher, 2022).

Strategie che incentivano la transizione verso la circolarità costituiscono un'efficace soluzione per ridurre gli impatti dovuti ai modelli lineari di produzione e consumo (Baratta, 2021). A tali strategie appartengono i processi di recupero, riuso e riciclo di sottoprodotti e rifiuti o più generalmente scarti. Le pratiche di ricerca sulla incorporazione di scarti nei materiali da costruzione si sono intensificate negli ultimi anni e sono particolarmente investigate nell'ambito dei processi produttivi di calcestruzzi, materiali ceramici, acciai e polimeri (Rahla, Mateus and Bragança, 2021).

Queste sperimentazioni dimostrano l'attualità e la complessità delle ricerche sul tema del riciclo, anche in riferimento ai più specifici ambiti dell'organizzazione della produzione (Butera, 2022) e del coinvolgimento del terzo settore (Mussinelli, Schiaffonati and Torricelli, 2022). In tale prospettiva si rileva la misura degli investimenti nel settore ambientale: nel 2019 un'azienda produttrice su cinque (21,5%) ha investito in azioni circolari con l'obiettivo di transitare verso modelli di consumo e produzione sostenibili (Carbonaro, 2022). Infine è opportuno menzionare il recente concetto di Buildings As Material Banks che mira a implementare l'applicazione dell'Economia Circolare negli edifici, attraverso la definizione di un database di controllo, integrato agli strumenti progettuali, capace di registrare le modalità con cui i materiali possono essere usati, riutilizzati o riciclati al termine della loro vita utile (Munaro and Tavares, 2021).

In ragione di tali istanze, il Dipartimento di Architettura dell'Università di Roma Tre ha in corso una linea di ricerca che coinvolge due aziende produttrici sui temi dell'innovazione ambientale di prodotto, intercettando la richiesta di nuovi modelli sostenibili e circolari per la gestione e la valorizzazione delle risorse. Tale linea di ricerca si pone nella direzione di favorire economie di agglomerazione (Lerma and Bruno, 2021), originate dalla prossimità geografica tra gli stakeholders, al fine

di incentivare la trasmissione di conoscenza, know-how e flussi materici. Ne conseguono due esperienze di ricerca, contraddistinte da un analogo approccio sperimentale, che affrontano il tema dell'additivazione di scarti nelle miscele di laterizio e calcestruzzo: esse condividono obiettivi, metodologia di ricerca e alcune procedure sperimentali. Le ricerche hanno infatti come obiettivo generale quello di realizzare una soluzione di prodotto con prestazioni ambientali migliorate, grazie all'impiego di scarti nel mix-design, e come obiettivi specifici la prototipazione di nuovi prodotti: un blocco in laterizio e un massetto in calcestruzzo.

La metodologia, allo stesso modo, è caratterizzata da una sequenzialità di attività condivise, ovvero: analisi dello scarto; progettazione teorica del mix-design; sperimentazione e interpretazione dei risultati; implementazione della sperimentazione (ove prevista) e realizzazione dei prototipi; monitoraggio delle prestazioni tecnologiche. Di entrambe le ricerche si illustrano gli studi e le esperienze pregresse relative all'impiego di scarti nelle relative miscele, le formulazioni teoriche sui mix-design e i risultati dell'attività di monitoraggio di alcune prestazioni tecnologiche e meccaniche.

Scarti locali da fanghi e residui metallici per un nuovo prodotto in laterizio |

La transizione del settore delle costruzioni verso un modello di sviluppo sostenibile, contraddistinto dall'azzeramento degli impatti ambientali e dalla valorizzazione delle risorse, richiede un profondo ripensamento degli attuali metodi di progettazione, nonché una riforma dei processi produttivi connessi ai materiali e prodotti da costruzione. Per questi ultimi si rende necessario adottare pratiche circolari, volte a limitare l'estrazione delle materie prime vergini, estendere il ciclo di vita di materiali e prodotti (durabilità) e, infine, riciclare i rifiuti per trasformarli in materie prime seconde.

In questo senso, il progetto La Circolarità delle Risorse Materiche – finanziato su fondi PON a tematica 'green' – promuove un'esperienza di mutua collaborazione con un'azienda produttrice di manufatti in laterizio, il Gruppo Ripa Bianca, e una società che incentiva le politiche circolari, la Sfrido S.r.l. Il progetto, accogliendo le specifiche esigenze dell'azienda partner, affronta il tema dell'innovazione incrementale delle miscele in laterizio, con l'obiettivo di sostituire una quota parte di materia prima argillosa con scarti reperiti sul territorio regionale di pertinenza dell'azienda, ovvero, l'Emilia-Romagna.

Metodologia e fasi della ricerca |

Il percorso di ricerca si compone di due fasi, condotte in modo sincronico, di carattere analitico e sperimentale. La prima si basa su attività di raccolta e studio di dati sul laterizio, riferite alla composizione materica e al processo produttivo, alle ricerche internazionali e, non ultimo, alla mappatura del territorio limitrofo per identificare potenziali siti di approvvigionamento delle risorse. Tali attività si avvalgono della metodologia Life Cycle Assessment (LCA) per definire criticità e confini entro cui intervenire. La seconda fase invece prevede di trasferire le riflessioni teoriche nello sviluppo di miscele di laterizio attraverso la sperimentazione di nuovi prodotti e processi di realizzazione su scala industriale.

La prima fase di raccolta e analisi dei dati adotta un approccio analitico capace di identificare i

pro e i contro di precipe ricerche, al fine di orientare le operazioni sul campo. In tal senso l'esplorazione della letteratura internazionale è orientata alla selezione di casi di studio, dove le pratiche circolari sono foriere di un nuovo concetto di scarto, non più inteso come un 'problema' ma come una 'risorsa'. La ricerca sullo stato dell'arte si è avvalsa delle principali piattaforme di divulgazione scientifica, quali Scopus, ResearchGate e ScienceDirect. In seguito alla definizione di un arco temporale di riferimento (dal 2015 al 2023) e alla selezione delle principali parole chiave ('clay substitute in brick', 'clay brick by waste', 'sludge in brick', 'sustainable brick') la documentazione estratta è stata catalogata e organizzata rilevando le informazioni utili per la seguente fase sperimentale.

Da tale indagine è emerso come la sostituzione dell'argilla – seppur parziale – sia un'operazione complessa. Infatti, sebbene essa sia un composto propenso alla contaminazione di più sostanze, è altresì il principale responsabile delle proprietà caratteristiche del laterizio, prima fra tutte la plasticità. Lo studio si è così concentrato nell'individuare scarti capaci di non inficiare la lavorabilità dell'impasto e di contribuire attivamente alla resa prestazionale e qualitativa del prodotto finito; tra di essi, i più significativi sono: i fanghi bentonitici (Javed et alii, 2020) e di depurazione dell'acqua (Taki, Gahlot and Kumar, 2020), la ganga di carbone (Xu et alii, 2017), gli ossidi metallici (Mendes et alii, 2019) e la polvere vulcanica (Cultrone, 2022).

Ognuna delle sostanze elencate è però caratterizzata da alcune criticità: ne sono un esempio i fanghi bentonitici, utilizzati nelle operazioni di perforazione per stabilizzare le pareti dei pozzi di estrazione e contenere la fuoriuscita di liquidi. Tali fanghi sono costituiti da frazioni argillose dalle elevate capacità plastiche ed espandenti; la loro applicazione deve quindi essere limitata tra l'1% e il 5% massimo (per evitare fenomeni di fessurazione) ma, al tempo stesso, supportano l'introduzione di una maggiore quota di materiale inerte (El Boukili et alii, 2023). Un altro esempio riguarda gli ossidi metallici, in grado di influenzare la resa cromatica del laterizio; percentuali comprese tra 1% e 7% restituiscono un colore arancione-rossastro, mentre nell'intervallo di valori tra l'8% e il 15% si genera un colore rosso brunito (Bautista-Marín, Esguerra-Arce and Esguerra-Arce, 2021). Lo studio delle ricerche internazionali ha perciò restituito un profilo ottimale di sostituzione compreso tra il 5% e il 30%, avvalorato da precedenti opere di catalogazione (Anjum et alii, 2022).

Le nozioni apprese dall'analisi della letteratura, condivise dall'esperienza pregressa del Gruppo Ripa Bianca, si traducono nell'attività di ricerca sul campo volta all'individuazione di scarti presenti in Emilia-Romagna, cui fa seguito la progettazione dei mix-design e il monitoraggio di alcune prestazioni. La decisione di concentrare la ricerca sul territorio regionale è da intendersi finalizzata al pieno adempimento delle politiche circolari, tali da favorire i cicli di approvvigionamento brevi (km 0), la simbiosi industriale e la sostenibilità economico-ambientale della filiera di recupero (Kiss, Ruskai and Takács-György, 2019), così come, in linea con recenti ricerche nazionali (Di Roma, Scarcelli and Minenna, 2019), il potenziamento dell'economia regionale e la valorizzazione del contesto socio-culturale.

Waste type	Classification according to CER/EER codes	Annual availability (tons/year)	Potential harvesting quantity (tons/year) according to Italian DM 05/02/98	Distance between companies (km)
Bentonite sludge	01.05.07	20.800	1000	140
Pickling metal oxides	12.01.15	1000	7000	190
Filter-pressed metal sludge	06.05.03	1000	4000	63

Tab. 1 | Annual availability and distances from producer sites of different waste selected for the mix-design (credit: the Authors, 2023).

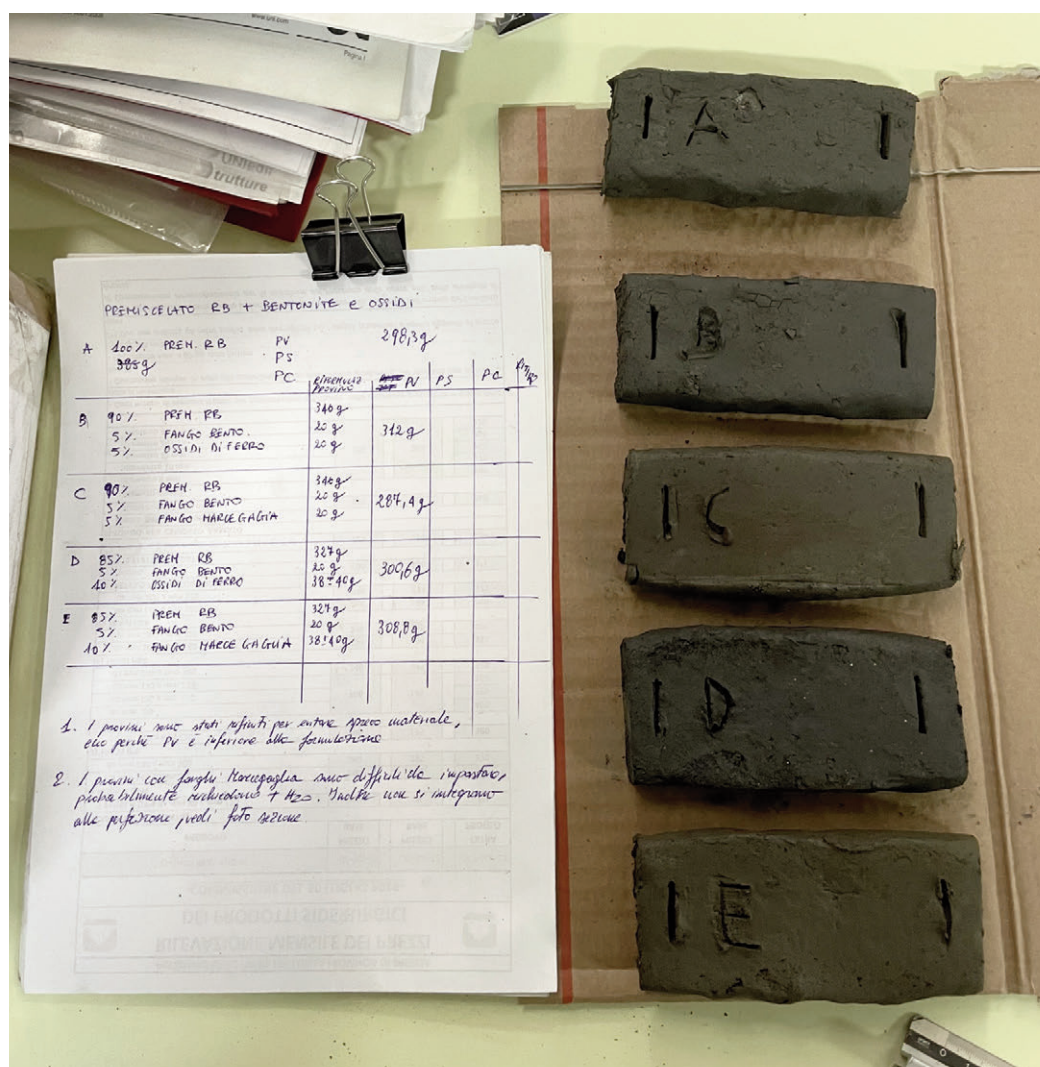


Fig. 1 | Samples made from bentonite sludge and metal scrap (credit: the Authors, 2023).

La selezione delle sostanze impiegabili nelle miscele di laterizio dagli impianti produttivi italiani è però subordinata a direttive nazionali. Il Decreto Ministeriale 5 febbraio 1998¹, nello specifico, definisce quali tipi di rifiuti possono essere recuperati dai produttori di laterizio. L'integrazione dell'apparato normativo con la mappatura regionale consente quindi di restringere il numero di variabili, da cui sono escluse la ganga di carbone e la polvere vulcanica. In maniera analoga i fanghi di depurazione delle acque, seppur autorizzati e ampiamente disponibili, sono anch'essi esclusi. Tale scelta è imputabile all'alto contenuto organico, dovuto alla decomposizione di organismi vegetali

e animali che provoca il rilascio di cattivi odori. La Tabella 1, elaborata in collaborazione con Sfrido S.r.l., riassume la disponibilità annuale, la quantità massima raccogliabile e la distanza dagli stabilimenti alla fornace Ripa Bianca dei fanghi bentonitici e dei residui metallici; questi ultimi suddivisi in ossidi e fanghi, derivanti – rispettivamente – da processi di decapaggio e filtropressatura. La stessa tabella evidenzia inoltre come alcuni rifiuti non raggiungano la quota massima impiegabile, per cui si richiede un'ulteriore indagine sul territorio, mentre altri superano il limite imposto dalla normativa e, pertanto, non sono interamente recuperabili. Tuttavia, la quantità potenzialmente

sostituita è definita prevalentemente dalla composizione della miscela di base e del volume processato annualmente dall'azienda. Il Gruppo Ripa Bianca, in questo senso, lavora circa 54.900 tonnellate/anno di materia, costituita da argilla (70%), acqua (8%) e altri additivi dimagranti (22%). La formulazione dei nuovi mix-design considera così una variazione percentuale tra il 5% e il 20%.

Risultati conseguiti | L'attività sperimentale si è tradotta nel trasferimento delle formulazioni teoriche a 11 campioni materici (Fig. 1), cui fa seguito il monitoraggio di alcune prestazioni (Tab. 2). L'esperienza pregressa del Gruppo Ripa Bianca ha permesso di escludere su base empirica – ossia tramite osservazione del provino – il mix n. 10, poiché il materiale inerte limita la plasticità dell'impasto, determinando la fessurazione in essiccazione e la disgregazione in cottura. Sulle restanti dieci formulazioni, superate le considerazioni sulla lavorabilità, la ricerca ha definito alcune proprietà dei campioni, come il ritiro (caratteristica fondamentale delle miscele di laterizio) e la densità.

Come si evince dalla Tabella 2, la ricetta di base (n. 0) ha un ritiro controllato del 5-6%, tale da garantire una resa qualitativa e prestazionale ottimale. Valori inferiori sono di fatto richiesti per i prodotti ceramici, mentre all'aumentare del ritiro si verificano fessurazioni e rotture. I risultati sul ritiro, ottenuti misurando con calibro ventesimale lo scostamento tra due tacche (distanza 100 mm) incise sul provino prima di sottoporlo a cicli di essiccazione e cottura, evidenziano come i valori dei campioni additivati con scarti (a esclusione dei mix. n. 4, 8 e 9) siano allineati a quelli della miscela di base. Contestualmente, il calcolo della densità dei diversi provini, eseguito secondo indicazioni normative², ha restituito un intervallo di valori simili alla ricetta base ($\pm 1.600 \text{ kg/m}^3$), con uno scostamento massimo di ca. 50 kg/m^3 (a eccezione del mix. n. 7). La commistione tra valutazioni empiriche e valutazioni scientifiche – tenuto conto della volontà di additivare quanta più sostanza riciclata all'interno dell'impasto (10-15%) – conduce alla selezione dei mix-design n. 2, 6 e 11 (Fig. 2), sui quali si intende approfondire lo studio della miscela.

I risultati sino a ora conseguiti con la ricerca, in attesa di ulteriori prove sul comportamento meccanico, dimostrano la possibilità di ridurre il quantitativo estratto di argilla vergine, sostituendola con scarti attualmente non valorizzati. Inoltre l'esperienza sinergica tra l'Università e l'azienda facilita il trasferimento tecnologico dalla scala laboratoriale a quella industriale, infatti, data la risposta positiva, sul mix-design n. 11 è in corso una prova

industriale; l'esito del test può condurre al suo impiego nella ricetta di base e, pertanto, alla sua commercializzazione.

Scarti e rifiuti di vetro piano per la produzione di calcestruzzo

La ricerca dal titolo Soluzioni Tecnologiche in Vetro a Elevato Contenuto Prestazionale è sviluppata in sinergia con l'azienda Vetral Acilia S.r.l., con cui si condividono obiettivi multiscalari che vedono come principale interesse il riciclo del vetro. Il progetto di ricerca interviene sul reimpiego della risorsa materica nell'ambito delle demolizioni partendo dal presupposto che gli interventi di nuova edificazione e sul patrimonio esistente generino una ingente quantità di rifiuti, tra cui il vetro (ISPRA, 2021). La ricerca sullo stato dell'arte si è avvalsa delle principali piattaforme internazionali di divulgazione, quali Google Scholar, ResearchGate, Science-Direct e software quali Mendeley. L'arco temporale di riferimento considerato è dal 2013 al 2023, entro cui è stata eseguita una ricerca per parole chiave, tra le principali 'recycled glass', 'recycled aggregates', 'glass aggregate', 'float glass waste', 'glass from C&D', 'soda lime silicate glass aggregate'.

Tale ricerca evidenzia come attualmente il riciclo del vetro piano – applicato prevalentemente nei serramenti – ossia del vetro sodo-calcestruzzo realizzato con il processo float, è un processo open-loop (Geboes, Galle and De Temmerman, 2022) che non consente l'upcycling del prodotto. Le cause principali di questa impossibilità sono intrinseche al prodotto stesso. Infatti, il vetro per serramenti è additivato con altri materiali quali silicani, polimeri plastici (polivinilbutirale) e sigillanti butilici, la cui presenza limita la pratica di upcycling; tali sostanze non consentono di ottenere un prodotto riciclato con le medesime prestazioni del prodotto da materia prima, prime tra tutte la trasparenza.

Le esperienze di ricerca sul vetro piano da costruzione e demolizione si stanno concentrando sulla valutazione di un possibile reimpiego di questo materiale, come materia prima seconda, all'interno di nuove miscele. Una linea di ricerca, che accomuna diverse sperimentazioni in atto, mira alla sostituzione – nel mix-design dei conglomerati cementizi – degli aggregati di origine minerale con scarti di vetro (Arivalagan and Sethuraman, 2020; Hamada et alii, 2022; Keerio et alii, 2022; Tamanna, Tuladhar and Sivakugan, 2020). Il reimpiego del vetro come materia prima seconda all'interno di calcestruzzi, grazie alla natura multi-materica di questi ultimi, è possibile sia in sostituzione di aggregati fini (diametro < 4 mm) e aggregati grossi (diametro > 4 mm) con diverse frazioni percentuali (Tab. 3), sia come legante: quest'ultima sostituzione avviene con particelle di dimensioni micrometriche (Chen et alii, 2020).

Metodologia e fasi della ricerca | Date le potenzialità del vetro – può essere riciclato e aggiunto in altri materiali con diverse attitudini (legante o aggregato) – la ricerca è stata articolata in due fasi: una fase investigativa e una sperimentale. La prima fase investigativa della ricerca ha valutato impasti con diverse percentuali di vetro riciclato, indagando le proprietà tecnologiche del materiale e le applicazioni (quantitative e qualitative) nei prodotti che animano il panorama dei processi edilizi sul territorio; la seconda fase ha sperimentato rifiuti da costruzione e demolizione in vetro piano per realiz-

zare nuovi mix-design per calcestruzzi con l'obiettivo del miglioramento prestazionale della miscela per la realizzazione di tecnologie tradizionali quali massetti e malte per murature e per intonaci.

Nella prima fase, gli studi condotti sul vetro come materia prima seconda hanno visto il coinvolgimento di questo materiale non solo come aggregato fine e grosso, ma anche come possibile sostituto parziale del legante: il comportamento pozzolanico del vetro permette una sostituzione parziale in peso del cemento, in quantità e granulometrie ben definite.

L'impiego di particelle di vetro di scarto compreso tra 40 µm, 20 µm e 10 µm ha prodotto delle resistenze a compressione, a 28 giorni rispettivamente di 51,5 MPa, 55,5 MPa e 66,6 MPa (Harrison, Berenjian and Seifan, 2020). Tali risultati rientrano pienamente nei range delle classi di resistenza del calcestruzzo tradizionale che, individuate dalla norma UNI EN 206:2016³, definiscono il materiale in funzione della resistenza a compressione cilindrica caratteristica ($f_{ck,cyl}$ ovvero f_{ck}) e della resistenza a compressione cubica caratteristica ($f_{ck,cube}$, ovvero R_{ck}), con classi minime di resistenza pari a 8-10 MPa fino a classi massime di resistenza pari 100-114 MPa, cui si aggiungono le specifiche per calcestruzzi leggeri, con valori minimi e massimi di resistenza compresi tra 8-9 MPa e 80-88 MPa.

Nelle recenti ricerche coordinate da Viviana Letelier sul vetro riciclato all'interno di malte per una riduzione di impatto ambientale, viene proposta una soluzione granulometrica ottimale (pari a 38 µm) per una sostituzione di cemento fino al 30% in peso (Letelier et alii, 2019). Con tale granulometria e percentuale di materia sostituita si ottengono malte con resistenza meccanica a 90 giorni pari a 30 MPa, superiori a malte con aggregati in vetro in percentuale del 10% e del 20% e granulometrie comprese nell'intervallo di valori > 38 µm e < 75 µm.

In riferimento alla sostituzione del vetro come aggregato fine, dalla indagine della prima fase emerge come i risultati migliori, relativi alla resistenza meccanica dei provini, si ottengono con percentuali di aggregati fini in peso tra il 20% e il 30% e grossi tra il 10% e il 20% (Arivalagan and Sethuraman, 2020; Hamada et alii, 2022; Keerio et alii, 2022; Tamanna, Tuladhar and Sivakugan, 2020). In particolare alcuni risultati dimostrano che la sostituzione di aggregati fini in vetro consente di realizzare un calcestruzzo con resistenze meccaniche a 28 giorni tra 32,5 e 33,5 MPa e percentuali di aggregati fini in vetro rispettivamente tra il 20% e il 30% oltre che con fumi di silice (Keerio et alii, 2022); con resistenze meccaniche a 28 giorni tra i 22 e i 27 MPa con percentuali di aggregati fini in vetro tra il 20% e il 30% in cementi Portland (Arivalagan and Sethuraman, 2021) e fino a 41,40 MPa con percentuali di sostituzione al 20% in cementi con f_{ck} pari a 32,5 MPa (Tamanna, Tuladhar and Sivakugan, 2020).

In sintesi, il vetro riciclato può sostituire aggregati e legante con opportune percentuali di peso, definite in base al suo rapporto granulometrico, realizzando diversi mix-design per molteplici funzioni e prestazioni compatibili con calcestruzzi tradizionali. La direzione della ricerca si pone l'obiettivo della sostituzione degli aggregati fini per questioni ambientali ed energetiche: ambientali poiché gli aggregati sono impiegati in maggiori

quantità nel mix-design dei conglomerati cementizi rispetto al legante, energetiche poiché il processo di frantumazione del vetro in aggregato fine richiede un minor consumo di energia rispetto alla polverizzazione (Chen et alii, 2020). La combinazione di questi due fattori indirizza la ricerca verso la scelta più sostenibile.

Seguendo tale direzione la seconda fase della ricerca, svolta beneficiando del know-how del Laboratorio Prove e Ricerca su Strutture e Materiali (PRISMa) dell'Università degli Studi Roma Tre, ha sperimentato la sostituzione di aggregati fini classici con vetro riciclato in grandezze comprese tra 1 e 4 mm (UNI EN 12620:2008)⁴ in calcestruzzi per massetti e malte (Fig. 3). In particolare la fase sperimentale è basata su una progressiva sostituzione percentuale in peso dell'aggregato fine naturale, con aggregato riciclato (vetro sodo-calcestruzzo) proveniente da attività di demolizione.

Dalla Tabella 4 si evince come la sostituzione, in un intervallo compreso tra il 20% e il 100%, avvenga esclusivamente per l'aggregato fine (sabbia di fiume), lasciando invariate le percentuali del mix-design delle altre componenti del calcestruzzo. È opportuno segnalare che, in prima analisi, è stata esclusa la prova di sostituzione degli aggregati grossi, a causa della ridotta aderenza dei granuli di vetro reperiti con il resto dell'impasto; tuttavia non se ne esclude una indagine futura ma a valle di una seconda lavorazione del vetro, finalizzata a implementare la porosità del materiale con granulometria di diametro maggiore a > 4 mm.

Risultati conseguiti | L'attività di sperimentazione condotta ha comportato la realizzazione di provini cubici di dimensioni di lato 150 mm (Fig. 4), realizzati secondo i criteri dimensionali e le caratteristiche disciplinate dalla norma UNI EN 12390-1⁵. Il legante impiegato per la miscela, la cui la composizione è riportata nella Tabella 2 è stato il cemento pozzolanico CEM IV/B(P) con resistenza a compressione a 28 giorni $\geq 32,5$ MPa: tale scelta è stata condizionata dalla volontà di prevenire le reazioni alcali-silice a lungo termine. La realizzazione dei provini ha permesso la verifica delle prestazioni tecnologiche, in riferimento alla lavorabilità del conglomerato cementizio. Mantenendo un rapporto ottimale acqua / cemento pari a 0,42 – con una percentuale di vetro del 20% – si osserva il miglioramento della lavorabilità dell'impasto: tale caratteristica è probabilmente riconducibile alla minore porosità dell'aggregato in vetro rispetto all'aggregato naturale fine.

La ricerca ha anche documentato le proprietà meccaniche, in particolare in riferimento alla resistenza a compressione. Infatti, coerentemente con i risultati di esperienze assimilabili (Harrison, Berenjian and Seifan, 2020; Arivalagan and Sethuraman, 2021), con il 20% di aggregato fine di vetro di diametro inferiore a <4 mm di spessore, le proprietà meccaniche sono risultate soddisfacenti rispetto a impasti analoghi. I valori riscontrati di resistenza a compressione a 28 giorni sono risultati pari a circa 32 MPa con sostituzione del 20% di aggregato fine in vetro, valore leggermente inferiore se confrontato con il provino senza aggregati in vetro e realizzato con la totalità di aggregati di origine lapidea (resistenza a compressione a 28 giorni pari a 32,5 MPa). Tali prestazioni risultano, seppur leggermente, superiori alle alte temperature. In futuro sono necessarie ulteriori indagini per

Mix n.	Mix composition (%)				Properties		
	Clay + additives	Bentonite sludge	Metal oxides	Metal sludge	Linear drying shrinkage (%)	Linear firing shrinkage (%)	Bulk density* (kg/m ³)
0	100	0	0	0	5	6	±1600
1	90	5	5	0	5	6	±1600
2	85	5	10	0	5	6	±1650
3	90	5	0	5	5	5	±1600
4	85	5	0	10	4	4	±1550
5	95	0	5	0	5	6	±1600
6	90	0	10	0	5	5	±1650
7	80	0	20	0	4	5	±1700
8	95	0	0	5	6	7	±1600
9	90	0	0	10	5	7	±1550
10	80	0	0	20	-	-	-
11	90	0	5	5	5	6	±1600

* The bulk density is calculated over a Gruppo Ripa Bianca's brick with dimension of: 350x250x190 mm | block perforation percentage ≤45%

Tab. 2 | Mix-design composition and some properties of samples (credit: the Authors, 2023).



ottimizzare la dimensione delle particelle e le percentuali di sostituzione in aggregati di vetro riciclato anche in funzione dei diversi tipi e colori.

Conclusioni: limiti, potenzialità e prospettive

Entrambe le ricerche hanno perseguito l'obiettivo di 'trasformare il rifiuto in risorsa di qualità' (Baratta, 2021) lavorando nella direzione di integrare la circolarità nei processi realizzativi di blocchi in laterizio e di massetti in calcestruzzo. La mutua collaborazione tra Aziende, Centri di ricerca, Società di consulenza e Università favorisce inoltre la simbiosi industriale, come nel caso del laterizio, dove la gestione di flussi materici quali rifiuti e scarti di altre lavorazioni, consente di avvicinare settori e imprese solo apparentemente non affini.

Tuttavia alcuni limiti e potenzialità di carattere generale possono essere espressi in relazione a entrambi i progetti di ricerca. Infatti se da un lato le pratiche sperimentali di riciclo di alcune tipologie di rifiuti possono essere considerate modelli di innovazione ambientale nell'ottica dell'Economia Circolare, dall'altro corrono il rischio di una non facile trasferibilità ai prodotti del settore edilizio. Tale limite è in parte da ricondurre al costo di conferimento in discarica del rifiuto, il quale è in alcuni casi più conveniente rispetto alle pratiche di recupero e riciclo e rende difficile trovare aziende disponibili a investire nell'innovazione, specie in assenza di supporto di una normativa che incentivi tali prassi, scoraggiando lo smaltimento in discarica (Baratta, 2021). Di contro la valorizzazione degli scarti locali, a favore di una filiera corta, limita il fenomeno dell'accelerazione dei cicli di consumo, che «[...] potrebbe portare alla abbreviazione della vita dei prodotti al fine di garantire all'economia la continuità dei processi di produzione e lavorazione» (Lavagna, 2022, p. 17).

Fig. 2 | Samples after the drying and firing processes (credit: the Authors, 2023).

Valicando i limiti e le criticità appena descritte le prospettive delle ricerche sono molteplici e possono essere esplicitate a breve e medio termine. Dati i riscontri positivi delle attività laboratoriali, a breve termine saranno avviate prove industriali i cui esiti condurranno alla commercializzazione dei prototipi. I prodotti, con le percentuali ad oggi stimate di materia recuperata e riciclata, sono in grado di assolvere pienamente sia ai requisiti e alle premialità previsti nei Criteri Ambientali Minimi del Decreto Ministeriale 23 giugno 2022⁶ che discendono dal Green Public Procurement⁷, sia ai criteri dei diversi Green Building Rating Systems⁸ immettendo sul mercato due prodotti con prestazioni migliorate. Le prospettive a medio termine sono invece da ricercare nella possibilità di applicare l'Intelligenza Artificiale e gli algoritmi di Machine Learning ai due processi industriali, con la finalità di facilitare la sperimentazione di nuove miscele additivate con scarti e prevedere simultaneamente la risposta prestazionale dei prodotti.

Construction-related processes are responsible for more than one-third of the waste and emissions produced on the planet; the sector is also

responsible for the consumption of about half of the raw material extractions for the manufacture of products and technical elements (Scalisi and Sposito, 2021). Such material consumption does not correspond to an adequate end-of-life product valorisation strategy: only 20-30% of construction and demolition waste goes to recycling (Munaro and Tavares, 2021). The long-term perspective is thus consumption rates of material resources that will exceed their regeneration rates, with severe consequences on material availability (Rahla, Mateus and Bragança, 2021).

It is, therefore, necessary to change the resource exploitation model, considering that the global demographic trend is constantly increasing. In this context, the contribution made by the Circular Economy (Kirchherr, Reike and Hekkert, 2017), which proposes a conscious and perpetual use of resources, in contrast to the linear or disposable model, is recognised at the European level in policies (Domenech and Bahn-Walkowiak, 2019) and strategic Plans (European Commission, 2020) as an approach for waste minimisation and valorisation that can facilitate the achievement of the Sustainable Development Goals (Ogunmakinde, Egbelakin and Sher, 2022). Strategies that incentivise the transition towards circularity provide an

efficient way to reduce the impacts of linear production and consumption patterns (Baratta, 2021). To such approaches belong the processes of recovery, reuse and recycling of by-products and waste, commonly referred to as scrap. Research practices on waste incorporation in construction materials have intensified in recent years and are specially researched within the production processes of concretes, ceramic materials, steels and polymers (Rahla, Mateus and Bragança, 2021).

These experiments demonstrate the topicality and complexity of recycling research, including in reference to the more specific areas of production organisation (Butera, 2022) and the involvement of the third sector (Mussinelli, Schiaffonati and Torricelli, 2022). In this perspective, it is worth noting the measure of investments in the environmental field: in 2019, more than one in five manufacturing companies (21,5%) invested in circular actions with the aim of moving towards sustainable consumption and production models (Carbonaro, 2022). Finally, it is worth mentioning the recent concept of Buildings As Material Banks, which aim to implement the application of the Circular Economy in buildings, by defining a control database integrated with design tools, capable of recording how materials can be used, reused or

Replacement level (%)	Particle size	Type of glass waste	Optimum glass waste (%)
0 - 20	≤ 4 mm for fine agg.	Building and car windows glass	20
0 - 20	> 4 mm for coarse agg.	Container and flat glass	20
0 - 20	0.15 - 4.75 mm	Building glass	20
0 - 50	0.15 - 9.5 mm	Sheet glass	10
0 - 60	≤ 4.75 mm	Bottles	23
100	4 -16 mm	Quartz, fibregalss and opal	Not mentioned
0 - 100	Coarse	Bottles	Less than 25
100	0.15 - 4.75	Bottles	Not mentioned
0 - 100	≤ 19 mm	Bottles	20
0 - 70	4.75 - 0.15 mm	Container	70
0 - 70	36 - 100 mm	Bottles	Less than 30
0 - 100	Less than 5 mm	Bottles	30
0 - 100	0.125 - 2.00 mm	Cullet glass	Not mentioned

Tab. 3 | Percentage of recycled glass substituting fine and coarse aggregates for concrete (credit: the Authors from Hamada et alii, 2022).



Fig. 3 | Parallelepiped concrete test specimen for screeds (dimensions 4x4x16 cm) with replacement of fine aggregates by recycled glass (credit: The Authors, 2023)

Mix n.	Binder (%) Pozzolanic cement 32.5 N	Coarse aggregates (%) 4 – 32 mm	Fine aggregates (%) River sand 0.5 – 4 mm	Fine aggregates (%) Soda-lime glass 0.5 – 4 mm	Replacement ratio (%)
01	100	100	100	0	100-0
02	100	100	80	20	80-20
03	100	100	60	40	60-40
04	100	100	40	60	40-60
05	100	100	20	80	20-80
06	100	100	5	100	100-0

Tab. 4 | Percentage replacement ratio of fine and coarse aggregates with a recycled soda-lime glass of 0.5-4 mm (credit: the Authors, 2023).



Fig. 4 | Cubic concrete test specimen (15 cm side) with replacement of fine aggregates by the recycled glass (credit: the Authors, 2023).

recycled at the end of their useful life (Munaro and Tavares, 2021). As a result of such instances, the Department of Architecture at the Roma Tre University is conducting a line of research involving two manufacturing companies of environmental product innovation, intercepting the demand for new sustainable and circular models for the management and valorisation of resources. This research line goes towards fostering economies of agglomeration (Lerma and Bruno, 2021), arising out of geographical closeness among stakeholders, to stimulate the transmission of knowledge, know-how and material flows.

The result is two research experiences, characterised by a similar experimental approach, addressing the topic of waste additives in brick and concrete mixtures: they share objectives, research methodology and testing procedures. The research has, in fact, as a general objective the realisation of a product solution with improved environmental performance, thanks to the use of waste in the mix-design, and as specific objectives the prototyping of new products: a brick and a concrete screed. Furthermore, it features a sequentiality of shared activities, i.e. scrap analysis, theoretical mix-design, experimentation and interpretation of results,

trial implementation (where foreseen) and prototype realisation, and monitoring of technological performance. Both research present previous studies and experiences on the use of waste in the relevant mixtures, theoretical formulations on mix-design and the results of monitoring some technological and mechanical performances.

Local sludge and metal waste for a new brick product | Construction’s transition to a sustainable development model, with zero environmental impact and valorisation of resources, requires a profound rethinking of current design methods and reform of production processes related to building materials and products. Circular practices have to be adopted for the latter, aimed at limiting the extraction of virgin raw materials, extending the life cycle of materials and products (durability) and, finally, recycling waste to transform it into secondary raw materials.

In this regard, the project La Circolarità delle Risorse Materiche (The Circularity of Material Resources) – utilising PON funds with a ‘green’ theme – promotes an experience of mutual collaboration with a company that produces brick products, the Ripa Bianca Group, and a company that encourages circular policies, Sfridoo S.r.l. The project, taking up the specific needs of the partner company, deals with the issue of incremental innovation of brick mixtures, with the aim of replacing a share of clay raw material with waste found in the company’s regional territory, i.e., Emilia-Romagna.

Research methodology and stages | The research consists of two phases, performed synchronously, of an analytical and experimental nature. The first consists of data collection and study activities on brick, referring to: the material composition and production process, international research and, last but not least, the mapping of the neighbouring territory to identify potential resource supply sites. These activities use the Life Cycle Assessment (LCA) methodology to define criticalities and boundaries within which to intervene. The second phase, meanwhile, envisages the transfer of theoretical reflections into the development of brick blends through the experimentation of new products and manufacturing processes on an industrial scale.

The first phase of data collection and analysis adopts an analytical approach capable of identi-

fying the pros and cons of specific research in order to orientate field operations. In this sense, the exploration of international literature aims at selecting case studies where circular practices are harbingers of a new concept of waste, no longer understood as a ‘problem’ but as a ‘resource’. State-of-the-art research took advantage of the principal platforms of scientific dissemination, such as Scopus, ResearchGate and Science-Direct. Following the definition of a reference timeframe (2015 to 2023) and the selection of the main keywords (‘clay substitute in brick’, ‘clay brick by waste’, ‘sludge in brick’, ‘sustainable brick’) the retrieved documentation was catalogued and organised, revealing useful information for the following experimental phase.

This investigation showed that the clay replacement – albeit partial – is a complex operation. In fact, although it is a compound prone to contamination by several substances, it is also the main responsible for the characteristic properties of bricks, first of all, plasticity. The study thus focused on identifying wastes capable of not affecting the workability of the mix and of actively contributing to the performance and quality of the finished product; among them, the most significant are bentonite sludge (Javed et alii, 2020) and water purification sludge (Taki, Gahlot and Kumar, 2020), coal gangue (Xu et alii, 2017), metal oxides (Mendes et alii, 2019) and volcanic dust (Cultro-ne, 2022).

Each of the listed substances is, however, politically critical. An example is bentonite sludge, widely utilised in drilling operations to stabilise the walls of extraction wells and contain spillage. Such muds consist of clay fractions with high plastic and expanding capacities; their application must therefore be limited to between 1% and a maximum of 5% (to avoid cracking phenomena) but, at the same time, they support the introduction of a higher proportion of inert material (El Boukili et alii, 2023). Another example concerns metal oxides, which can influence the colour rendering of bricks; percentages between 1% and 7% give a reddish-orange colour, while in the range between 8% and 15% a burnished red colour is generated (Bautista-Marín, Esguerra-Arce and Esguerra-Arce, 2021). International research has consequently produced an optimal substitution profile of between 5% and 30%, corroborated by previous cataloguing works (Anjum et alii, 2022).

The concepts acquired from the analysis of the literature, supported by Ripa Bianca Group's previous experience, result in the field research activity aimed at identifying the waste present in Emilia-Romagna, followed by the mix-design and monitoring of some performances. The decision to focus the research on the regional territory is to be understood as aimed at the complete fulfilment of circular policies, such as favouring short supply cycles (km 0), industrial symbiosis and the economic-environmental sustainability of the recovery chain (Kiss, Ruskai and Takács-György, 2019), as well as, in line with recent national research (Di Roma, Scarcelli and Minenna, 2019), the strengthening of the regional economy and the enhancement of the socio-cultural context.

However, the selection of substances for use in Italian brick mixtures is subject to national directives. The Italian Ministerial Decree of 5 February 1998¹ defines which types of waste can be recovered by brick producers. Integrating the regulatory apparatus with regional mapping allows a restriction of the number of variables from which coal gangue and volcanic dust remain excluded. This choice is attributable to the high-organic content due to the decomposition of plant and animal organisms, which causes the release of unpleasant odours.

Table 1, drawn up in collaboration with Sfridoo S.r.l., summarises the annual availability, the maximum quantity collectable and the distance from the plants to the Ripa Bianca furnace of bentonite sludge and metal residues; the latter divided into oxides and sludges, deriving – respectively – from pickling and filter pressing processes. The same table also shows how some wastes do not reach the maximum amount usable, such that further investigation of the area is required, while others exceed the limit imposed by the regulations and are therefore not fully recoverable. Its potential replacement quantity, however, is mainly determined by the composition of the base mix and the volume processed annually by the company. In this sense, the Ripa Bianca Group processes approximately 54.900 tonnes / year of material, consisting of clay (70%), water (8%) and other slimming additives (22%). New mix designs, therefore, consider a percentage variation between 5% and 20%.

Achievements | Experimental activity took the form of transferring the theoretical formulations to 11 material samples (Fig. 1), followed by the monitoring of some performances (Tab. 2). The Ripa Bianca Group's previous experience allowed them to exclude on empirical grounds – i.e. by observing the specimen – mix no. 10, as the inert material limits the plasticity of the mix, causing it to crack during drying and disintegrate during firing. On the remaining ten formulations, having overcome the considerations of workability, the research defined a few properties of the samples, such as shrinkage (a fundamental characteristic of brick mixes) and density.

As can be seen from Table 2, the basic recipe (no. 0) has a controlled shrinkage of 5-6%, which ensures optimal quality and performance. Lower values for ceramic products are required, while increasing shrinkage leads to cracking and breakage. The shrinkage results, obtained by measuring with a ventesimal calibre the deviation be-

tween two notches (distance 100 mm) engraved on the sample before subjecting it to the drying and firing cycles, show that the values of the specimens with waste additives (excluding mixes no. 4, 8 and 9) align with those of the base mix.

At the same time, the density calculation of the various samples, performed by normative indications², returned a range of values similar to the base recipe ($\pm 1.600 \text{ kg/m}^3$), with a maximum deviation of approx. 50 kg/m^3 (except for mix. no. 7). The mixture of empirical and scientific evaluations – taking into account the desire to add as much recycled substance as possible to the mix (10-15%) – leads to the selection of mix-design no. 2, 6 and 11 (Fig. 2), which are going to be further studied.

The research results achieved so far, pending further tests on mechanical behaviour, demonstrate the possibility of reducing the quantity of extracted raw clay by replacing it with currently unused waste. Moreover, the synergic experience between the University and the company facilitates technology transfer from the laboratory to the industrial scale. In fact, given the positive response, an industrial trial is underway on mix-design no. 11. The outcome of the test may lead to its use in the basic recipe and, therefore, to its commercialisation.

Scrap and waste from flat glass for concrete production

| The research entitled Technological Solutions in Glass with High-performance Content runs jointly with Vetral Acilia S.r.l., a company with which it shares multi-scalar objectives that have glass recycling as its principal interest. The research project deals with the reuse of material resources in the field of demolition, starting from the assumption that new buildings and existing heritage interventions generate a large amount of waste, including glass (ISPRA, 2021). State-of-the-art research utilised major international dissemination platforms such as Google Scholar, ResearchGate, Science-Direct and software such as Mendeley. The time frame taken into account is from 2013 to 2023, where a keyword search 'recycled glass', 'recycled aggregates', 'glass aggregate', 'float glass waste', 'glass from C&D', 'soda lime silicate glass aggregate', among others, was performed.

Such research highlights how the recycling of flat glass – mainly applied in windows and doors – i.e. soda-lime glass made with the float process, is currently an open-loop process (Geboes, Galle and De Temmerman, 2022), which does not allow upcycling of the product. The main reasons for this impossibility are intrinsic to the product itself. Window glass is additive with other materials such as silicones, plastic polymers (polyvinyl butyral) and butyl sealants, the presence of which limits upcycling. These substances do not make it possible to obtain a recycled product with the same performance as the raw material product, foremost among which is transparency.

Research experiments on construction and demolition flat glass focus on evaluating the possible reuse of this material as a secondary raw material in new mixtures. One line of research, which links several ongoing experiments, aims at the replacement – in the mix-design of concrete mixes – of aggregates of mineral origin with glass waste (Arivalagan and Sethuraman, 2020; Hama-

da et alii, 2022; Keerio et alii, 2022; Tamanna, Tuladhar and Sivakugan, 2020). The reuse of glass as a secondary raw material within concretes, due to the multi-material nature of the latter, is possible both as a replacement of aggregates, fine (diameter < 4 mm) and coarse aggregates (diameter > 4 mm) with different percentage fractions (Tab. 3), and as a binder: the latter replacement occurs with micrometre-sized particles (Chen et alii, 2020).

Methodology and research phases

| Given the potential of glass – which can be recycled and added to other materials with different aptitudes (binder or aggregate) – research involved a two-stage investigation phase and an experimental phase. Research in the first investigative phase evaluated mixes with various percentages of recycled glass, investigating the technological properties of the material and the applications (quantitative and qualitative) in products that animate the panorama of building processes in the area. The second phase experimented with construction and demolition waste in flat glass to create new mix designs for concrete to improve the performance of the mix for traditional technologies such as screeds and mortars for masonry and plaster.

During the first phase, studies conducted on the glass as a secondary raw material saw the involvement of this material not only as a fine and coarse aggregate but also as a possible partial substitute for the binder: the pozzolanic behaviour of glass allows, in fact, a partial substitution by weight of cement, in well-defined quantities and particle sizes.

Glass particles between $40 \mu\text{m}$, $20 \mu\text{m}$ and $10 \mu\text{m}$ produced compressive strengths at 28 days of 51.5 MPa, 55.5 MPa and 66.6 MPa (Harrison, Berenjian and Seifan, 2020). These results fall within the range of resistance classes of traditional concrete, which, as identified by the UNI EN 206:2016³ standard, define the material according to the characteristic cylindrical compressive strength ($f_{ck,cyl}$ or f_{ck}) and characteristic cubic compressive strength ($f_{ck,cube}$, or R_{ck}), with minimum resistance classes of 8-10 MPa up to maximum resistance classes of 100-114 MPa, to which are added the specifications for lightweight concretes, with minimum and maximum resistance values between 8-9 MPa and 80-88 MPa.

Recent research by Viviana Letelier on recycled glass in mortars to reduce environmental impact proposes an optimal grain size ($38 \mu\text{m}$) for cement substitution of up to 30 per cent by weight (Letelier et alii, 2019). Mortars with 30 MPa mechanical strength at 90 days above mortars with 10% and 20% glass aggregates and grain sizes in the range of $> 38 \mu\text{m}$ and $< 75 \mu\text{m}$ are obtained with this grain size and percentage of substituted material.

With reference to the substitution of glass as a fine aggregate, the investigation of the first phase shows that the best results, relative to the mechanical strength of the specimens, are obtained with weight percentages of fine aggregates between 20% and 30% and coarse aggregates between 10% and 20% (Arivalagan and Sethuraman, 2020; Hamada et alii, 2022; Keerio et alii, 2022; Tamanna, Tuladhar and Sivakugan, 2020). In particular, some results show that the substitution of fine glass aggregates allows for concrete

with 28-day mechanical strengths between 32.5 and 33.5 MPa and percentages of fine glass aggregates between 20% and 30%, respectively, as well as silica fume (Keerio et alii, 2022); with 28-day mechanical strengths between 22 and 27 MPa with percentages of fine glass aggregates between 20% and 30% in Portland cement (Arivalagan and Sethuraman, 2021) and up to 41.40 MPa with 20% replacement percentages in types of cement with fck of 32.5 Mpa (Tamanna, Tuladhar and Sivakugan, 2020).

Briefly, recycled glass can replace aggregates and binders with appropriate weight percentages, defined according to its particle size ratio, producing different mix designs for multiple functions and performances compatible with traditional concretes. The research direction aims to replace fine aggregates due to environmental and energy issues: environmental since aggregates are used in higher quantities in the mix-design of concrete mixes than the binder, as well as energetic since the process of crushing glass into fine aggregate requires less energy consumption than pulverisation (Chen et alii, 2020). The combination of these two factors directs research towards the most sustainable choice.

Following this direction, the second phase of the research carried out benefiting from the know-how of the Laboratory for Tests and Research on Structures and Materials (PRiSMa) of the Roma Tre University, experimented with the substitution of classic fine aggregates with recycled glass in sizes between 1 and 4 mm (UNI EN 12620:2008)⁴ in screed and mortar concretes (Fig. 3). In particular, this experimental phase consists of a progressive weight percentage substitution of the fine natural aggregate with recycled aggregate (soda lime glass) from demolition activities.

Table 4 shows how the replacement, within an interval between 20% and 100%, occurs exclusively for the fine aggregate (river sand), leaving the mix-design percentages of the other concrete components unchanged. It is worth noting that, in the first analysis, the replacement test for coarse aggregates is ruled out due to the reduced adherence of the glass granules found with the rest of the mix; however, this does not exclude a future investigation, but downstream of a second processing of the glass, aimed at implementing the porosity of the material with a grain size greater than > 4 mm.

Acknowledgements

The paper is the result of a joint reflection of the Authors. Despite this, the introductory and ‘Conclusions: limits, potential and perspectives’ paragraphs belong to Adolfo F. L. Baratta and L. Calcagnini, the paragraph ‘Local sludge and metal waste for a new brick product’ to J. Andreotti, the paragraph ‘Scrap and waste from flat glass for concrete production’ to Luca Trulli. The Authors would like to thank Dr M. Marconi and the Ripa Bianca Group, Architect M. Lazzaroni and Sfridoo S.r.l., Prof. R. Giordano, Vetral Acilia S.r.l., Prof. S. Santini and the Laboratorio Prove e Ricerca su Strutture e Materiali (PRiSMa) of the Roma Tre University for their support of the research.

Results achieved | Testing involved the production of cubic test specimens with dimensions of 150 mm side (Fig. 4), manufactured according to the dimensional criteria and characteristics governed by the UNI EN 12390-1⁵ standard. The binding agent used for the mixture, whose composition appears in Table 2, was pozzolanic cement CEM IV/B(P) with a compressive strength at 28 days ≥ 32.5 Mpa: this choice proved beneficial to prevent alkali-silica reactions in the long term. The test specimens allowed the technological performance assessment of the workability of the cement mix. Maintaining an optimal water / cement ratio of 0.42 – with a glass percentage of 20% – improved the workability of the mixture: this characteristic is probably attributable to the lower porosity of the glass aggregate compared to the natural aggregate fine.

Research has also documented the mechanical properties, especially compressive strength. Consistent with the results of similar experiments (Harrison, Berenjian and Seifan, 2020; Arivalagan and Sethuraman, 2021), with 20% fine glass aggregate less than < 4 mm in diameter, the mechanical properties were satisfactory compared to similar mixtures. The values found for the 28-day compressive strength were approximately 32 MPa with 20% fine glass aggregate replacement, which was slightly lower when compared to the specimen without glass aggregate and made with all stone aggregate (28-day compressive strength of 32.5 MPa). Such performance is, albeit slightly, higher at high temperatures. Further investigations are necessary to optimise the particle size and replacement percentages in recycled glass aggregates for different types and colours in the future.

Conclusions: limits, potential and perspectives | Both research projects aimed to ‘transform waste into a quality resource’ (Baratta, 2021) while working towards integrating circularity into the production processes of brick blocks and concrete screeds. Mutual collaboration between companies, research centres, consultancy firms and Universities also favours industrial symbiosis, as in the case of brickwork, where the management of material flows such as waste and rejects from other processes brings sectors and companies closer together that are only apparently unrelated. Some limitations and potentials of a general nature can, however, still apply to both re-

search projects. If, in fact, on the one hand, the experimental practices of recycling certain types of waste can be considered models of environmental innovation in the perspective of the Circular Economy, on the other hand, they run the risk of not being easily transferable to products in the building sector. This limitation is partly to be attributed to the cost of landfilling waste, which is in some cases cheaper than recovery and recycling practices and makes it difficult to find companies willing to invest in innovation, especially in the absence of supporting legislation that incentivises such practices, discouraging landfilling (Baratta, 2021). On the other hand, the valorisation of local waste in favour of a short chain limits the phenomenon of the acceleration of consumption cycles, which could lead to the shortening of the life of products in order to guarantee the economy the continuity of production and processing processes (Lavagna, 2022).

By overcoming the limitations and criticalities mentioned above, research prospects are manifold and may become explicit in the short and medium term. Given the positive feedback from laboratory activities, in the short term, there will be industrial trials whose results will lead to the commercialisation of prototypes. With the percentages of recovered and recycled materials estimated to date, products can fully meet both the requirements and rewards outlined in the Minimum Environmental Criteria of the Italian Ministerial Decree of 23 June 2022⁶ that derive from Green Public Procurement⁷, and the criteria of the various Green Building Rating Systems⁸ by placing two products with improved performance on the market. Medium-term prospects lie in the possibility of applying Artificial Intelligence and Machine Learning algorithms to the two industrial processes to facilitate the experimentation of new additive mixtures with waste and simultaneously predict the performance response of the products.

Notes

1) Italian D.M. 5 February 1998 – ‘Individuazione dei rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero ai sensi degli articoli 31 e 33 del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22’, published in Gazzetta Ufficiale, n. 88, 16/04/1998. [Online] Available at: gazzettaufficiale.it/eli/id/1998/04/16/098A3052/sg%20 [Accessed 24 March 2023].

2) UNI EN 771-1:2015 – ‘Specification for masonry units – Part 1: Clay masonry units (annexe A)’; UNI EN 772-13:2002 – ‘Methods of test for masonry units – Determination of net and gross dry density of masonry units (except for natural stone)’.

3) UNI EN 206:2016 – ‘Concrete – Specification, performance, production and conformity’.

4) UNI EN 12620:2008 – ‘Aggregates for concrete’.

5) UNI EN 12390-1:2021 – ‘Testing hardened concrete – Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds’.

6) Italian D.M. 23 June 2022 – ‘Criteri ambientali minimi per l’affidamento del servizio di progettazione di interventi edilizi, per l’affidamento dei lavori per interventi edilizi e per l’affidamento congiunto di progettazione e lavori per interventi edilizi’, published in in Gazzetta Ufficiale, n. 183, 06/08/2022. [Online] Available at: gazzettaufficiale.it/eli/id/2022/08/06/22A04307/sg [Accessed 24 March 2023].

7) The Environmental Criteria regulated under Green

Public Procurement (GPP) are available online at: ec.europa.eu/environment/gpp/eu_gpp_criteria_en.htm [Accessed 24 March 2023].

8) Green Building Rating Systems (GBRS) are voluntary standards measuring the sustainability level of buildings. Such systems – by means of multi-criteria assessments of environmental, social and economic aspects – award scores to choices made during the design, construction, use and building demolition phases. Construction works receive different levels of sustainability depending on the score achieved. Today there are several GBRS, the most well-known and widespread in the international context being, by way of example: LEVEL(s); Leadership in Energy and Environmental Design (LEED); WELL; Building Research Establishment Environmental Assessment Method (BREEAM).

References

- Anjum, F., Yasin Naz, M., Ghaffar, A., Kamran, K., Shukrullah, S. and Ullah, S. (2022), “Sustainable insulation porous building materials for energy-saving perspective – Stones to environmentally friendly bricks”, in *Construction and Building Materials*, vol. 318, article 125930, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125930 [Accessed 24 March 2023].
- Arivalagan, S. and Sethuraman, V. S. (2021), “Experimental study on the mechanical properties of concrete by partial replacement of glass powder as fine aggregate – An environmental friendly approach”, in *Materials Today – Proceedings*, vol. 45, pp. 6035-6041. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.722 [Accessed 24 March 2023].
- Baratta, A. F. L. (2021), “From resource circularity policies to the zero-waste strategy | Dalle politiche per la circolarità delle risorse alla strategia zero rifiuti”, in *Agathón – International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 9, pp. 32-41. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/932021 [Accessed 24 March 2023].
- Bautista-Marín, J. D., Esguerra-Arce, A. and Esguerra-Arce, J. (2021), “Use of an industrial waste as a pigment in clay bricks and its effects on the mechanical properties”, in *Construction and Building Materials*, vol. 206, article 124848, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124848 [Accessed 24 March 2023].
- Butera, F. (2022), “The PNRR to regenerate Italian organisations in the ecological and digital transition | Il PNRR per rigenerare le organizzazioni italiane nella transizione ecologica e digitale”, in *Techne | Journal of Technology for Architecture*, vol. 23, pp. 26-34. [Online] Available at: doi.org/10.36253/techne-12917 [Accessed 24 March 2023].
- Carbonaro, C. (2022), “La circolarità nell’industria Life Cycle Design per l’innovazione di prodotto e processo”, in Lavagna, M. (ed.), *LCA in Edilizia – Ambiti applicativi e orientamenti futuri della metodologia – Life Cycle Assessment nel settore delle costruzioni*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna (RN), pp. 91-104.
- Chen, Z., Wang, Y., Liao, S. and Huang, Y. (2020), “Grinding kinetics of waste glass powder and its composite effect as pozzolanic admixture in cement concrete”, in *Construction Building Material*, vol. 239, article 117876, pp. 1-8. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117876 [Accessed 24 March 2023].
- Cultrone, G. (2022), “The use of Mount Etna volcanic ash in the production of bricks with good physical-mechanical performance – Converting a problematic waste product into a resource for the construction industry”, in *Ceramics International*, vol. 48, issue 4, pp. 5724-5736. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.11.119 [Accessed 24 March 2023].
- Di Roma, A., Scarcelli, A. and Minenna, V. (2019), “RE-STONED – Dalla Polvere di Scarto alla Pietra Sostenibile | RESTONED – From Waste Material to Sustainable Stone”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 5, pp. 183-190. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/5212019 [Accessed 24 March 2023].
- Domenech, T. and Bahn-Walkowiak, B. (2019), “Transition towards a resource efficient circular economy in Europe”, in *Ecological Economics*, vol. 155, pp. 7-19. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.11.001 [Accessed 24 March 2023].
- El Boukili, G., Erba, S., Kifani-Sahban, F. and Khaldoun, A. (2023), “Improving rheological and mechanical properties of non-plastic clay soil from Bensmim region (Morocco) using bentonite additions – Suitability for building application”, in *Journal of Building Engineering*, vol. 63, Part B, article 105525, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.job.2022.105525 [Accessed 24 March 2023].
- 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*, document 52020DC0098, 98 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN [Accessed 24 March 2023].
- Geboes, E., Galle, W. and De Temmerman, N. (2022), “Make or break the loop – A cross-practitioners review of glass circularity”, in *Glass Structures & Engineering*, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s40940-022-00211-y [Accessed 24 March 2023].
- Hamada, H., Alattar, A., Tayeh, B., Yahaya, F. and Thomas, B. (2022), “Effect of recycled waste glass on the properties of high-performance concrete – A critical review”, in *Case Studies in Construction Materials*, vol. 17, article e01149, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01149 [Accessed 24 March 2023].
- Harrison, E., Berenjian, A. and Seifan, M. (2020), “Recycling of waste glass as aggregate in cement-based materials”, in *Environmental Science and Ecotechnology*, vol. 4, article 100064, pp. 1-8. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ese.2020.100064 [Accessed 24 March 2023].
- ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (2021), *Rapporto rifiuti speciali – Edizione 2021*. [Online] Available at: isprambiente.gov.it/files2021/publicazioni/rapporti/rapportorifutispeciali_ed-2021_n-345_versionedati-di-sintesi.pdf [Accessed 24 March 2023].
- Javed, U., Khushnood, R. A., Memon, S. A., Jalal, F. E. and Zafar, M. S. (2020), “Sustainable incorporation of lime-bentonite clay composite for production of ecofriendly bricks”, in *Journal of Cleaner Production*, vol. 263, article 121469, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121469 [Accessed 24 March 2023].
- Keerio, M. A., Abbasi, S. A., Kumar, A., Bheel, N., ur Rehman, K. and Tashfeen, M. (2022), “Effect of Silica Fume as Cementitious Material and Waste Glass as Fine Aggregate Replacement Constituent on Selected Properties of Concrete”, in *Silicon*, vol. 14, pp. 165-176. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s12633-020-00806-6 [Accessed 24 March 2023].
- Kirchherr, J., Reike, D. and Hekkert, M. (2017), “Conceptualizing the circular economy – An analysis of 114 definitions”, in *Resource Conservation and Recycling*, vol. 127, pp. 221-232. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005 [Accessed 24 March 2023].
- Kiss, K., Ruskai, C. and Takács-György, K. (2019), “Examination of Short Supply Chains Based on Circular Economy and Sustainability Aspects”, in *Resources*, vol. 8, issue 4, article 161, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.3390/resources8040161 [Accessed 24 March 2023].
- Lavagna, M. (2022), “Percorsi di applicazione del Life Cycle. Assessment nel settore edilizio”, in Lavagna, M. (ed.), *LCA in Edilizia – Ambiti applicativi e orientamenti futuri della metodologia – Life Cycle Assessment nel settore delle costruzioni*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna (RN), pp. 13-26.
- Lerma, B. and Bruno, E. V. (2021), “Riconversione industriale nei cluster produttivi – Design e conservazione attiva del know-how locale | Industrial reconversion in productive clusters – Design and active preservation of local know-how”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 9, pp. 194-203. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/9192021 [Accessed 24 March 2023].
- Letelier, V., Henríquez-Jara, B. I., Manosalva, M., Parodi, C. and Ortega, J. M. (2019), “Use of Waste Glass as A Replacement for Raw Materials in Mortars with a Lower Environmental Impact”, in *Energies*, vol. 12, issue 10, article 1974, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en12101974 [Accessed 24 March 2023].
- Mendes, B. C., Pedroti, L. G., Fontes, M. P. F., Ribeiro, J. C. L., Vieira, C. M. F., Pacheco, A. A. and de Azevedo, A. R. G. (2019), “Technical and environmental assessment of the incorporation of iron ore tailings in construction clay bricks”, in *Construction and Building Materials*, vol. 227, article 116669, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.050 [Accessed 24 March 2023].
- Munaro, M. R. and Tavares, S. F. (2021), “Materials passport’s review – Challenges and opportunities toward a circular economy building sector”, in *Built Environment Project and Asset Management*, vol. 11, issue 4, pp. 767-782. [Online] Available at: doi.org/10.1108/BEPAM-02-2020-0027 [Accessed 24 March 2023].
- Mussinelli, E., Schiaffonati, F. and Torricelli, M. C. (2022), “For a necessary change | Per un cambiamento necessario” in *Techne | Journal of Technology for Architecture*, vol. 23, pp. 15-20. [Online] Available at: doi.org/10.36253/techne-12915 [Accessed 24 March 2023].
- Ogunmakinde, O. E., Egbelakin, T. and Sher, W. (2022), “Contributions of the circular economy to the UN Sustainable Development Goals through sustainable construction”, in *Resources, Conservation & Recycling*, vol. 178, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106023 [Accessed 24 March 2023].
- Rahla, M. K., Mateus, R. and Bragança, L. (2021), “Selection Criteria for Building Materials and Components in Line with the Circular Economy Principles in the Built Environment – A Review of Current Trends”, in *Infrastuctures*, vol. 6, issue 49, pp. 1-35. [Online] Available at: doi.org/10.3390/infrastuctures6040049 [Accessed 24 March 2023].
- Scalisi, F. and Sposito, C. (2021), “Strategie e approcci green – Un contributo dall’off-site e dall’upcycling dei container marittimi dismessi | Green strategies and approaches – A contribution from the off-site and upcycling of discarded shipping containers”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 10, pp. 92-119. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1092021 [Accessed 24 March 2023].
- Taki, K., Gahlot, R. and Kumar, M. (2020), “Utilization of fly ash amended sewage sludge as brick for sustainable building material with special emphasis on dimensional effect”, in *Journal of Cleaner Production*, vol. 274, article 123942, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123942 [Accessed 24 March 2023].
- Tamanna, N., Tuladhar, R. and Sivakugan, N. (2020), “Performance of recycled waste glass sand as partial replacement of sand in concrete”, in *Construction and Building Materials*, vol. 239, article 117804, pp. 1-9. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117804 [Accessed 24 March 2023].
- Xu, H., Song, W., Cao, W., Shao, G., Lu, H., Yang, D., Chen, D. and Zhang, R. (2017), “Utilization of coal gangue for the production of brick”, in *Journal of Material Cycles and Waste Management*, vol. 19, pp. 1270-1278. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s10163-016-0521-0 [Accessed 24 March 2023].