

Superuse e upcycling dei materiali di scarto in architettura: progetto e sperimentazione

RICERCA E
SPERIMENTAZIONE/
RESEARCH AND
EXPERIMENTATION

Serena Baiani, Paola Altamura,
Dipartimento PDTA, Sapienza Università di Roma, Italia

serena.baiani@uniroma1.it
paola.altamura@uniroma1.it

Abstract. Il programma di ricerca sull'applicazione dell'economia circolare all'ambiente costruito, la cui urgenza è proclamata a livello comunitario e nazionale, lavora su due approcci complementari: riuso (*superuse*) e riciclo (*upcycling*). Il primo, teorico ed applicato a un caso pilota, con uno dei primi tentativi di trasporre all'Italia il processo di *scouting* degli scarti per la creazione di *harvest map* a supporto del progetto. Il secondo, con la start up Atlante Inerti Project che, con fondi dell'EIT, sperimenta un inedito uso di aggregati riciclati per la produzione di manufatti in CLS per l'arredo urbano con stampa additiva 3D in sabbia e prefabbricazione con vibro-compressione, caratterizzando conglomerati dalle prestazioni convincenti di interesse per ulteriori applicazioni in edilizia.

Parole chiave: Superuse; Upcycling; Materiali da costruzione; Economia circolare; Sperimentazione.

Introduzione

L'ambito di ricerca e sperimentazione del GdR sviluppa l'applicazione dell'approccio circolare all'ambiente costruito, ponendo la fase di scelta dei materiali da costruzione tra i primi step del processo progettuale. L'individuazione di materie disponibili a scala locale, in particolare attraverso la valorizzazione degli scarti provenienti anche da altre filiere, è intesa come prerequisito per il progetto, coerentemente con l'istanza della drastica riduzione del consumo di materie prime nel settore edilizio. La ricerca segue infatti l'orientamento interpretativo introdotto da Commoner sulla *chiusura del cerchio* (1971), riformulato nel modello *Cradle to Cradle* che, eliminando il concetto stesso di rifiuto, propone un approccio secondo il quale devono essere le preziose sostanze nutritive contenute nei materiali a modellare il progetto e a definirlo (McDonough e Braungart, 2002). Del resto, il problema dell'elevato costo ambientale e socio-economico delle materie prime in edilizia e l'obiettivo della chiusura dei cicli di produzione, fondamentale nel delineare il paradigma ecologico, emergono nella centralità che l'UE riconosce ai processi di

economia circolare applicati al settore edile, strategico per il volume di materiali impiegati e rifiuti prodotti. Già nel 2008, la Dir. 98 sui rifiuti fissava un target per l'aumento del tasso di recupero degli scarti da costruzione e demolizione (C&D) che, entro il 2020, dovranno essere riutilizzati o rigenerati in materie prime seconde (MPS) per almeno il 70% in peso. La *Roadmap verso un'Europa efficiente nell'impiego delle risorse* (2011) ed il pacchetto di misure "Lanello mancante" (2015), rafforzato nel 2018 con modifiche alle Dir. UE rifiuti e *circular economy*, hanno rimarcato l'importanza di strumenti trasversali, come gli appalti pubblici "verdi", nel superamento delle barriere di mercato in settori critici come l'edilizia. Coerentemente, il *Work Programme 2018-2020* di H2020 – *Climate action, environment, resource efficiency and raw materials* – pone il focus sul ruolo delle pratiche di economia circolare nei processi di rigenerazione urbana, sulla valorizzazione dei sottoprodotti e la promozione dello sviluppo di processi sostenibili di lavorazione, recupero, riuso e riciclo dei materiali da costruzione. In Italia, nonostante virtuose norme di settore siano in vigore da vent'anni (D.lgs. 22/1997), solo nel 2015 si è reso cogente il recupero dei rifiuti da C&D per gli interventi su edifici pubblici, con l'introduzione dei Criteri Ambientali Minimi per l'Edilizia del PAN GPP (Piano d'Azione Nazionale per il Green Public Procurement), la cui adozione è obbligatoria ai sensi del nuovo Codice degli Appalti. I Criteri prescrivono il ricorso a prodotti con contenuto di riciclato, la produzione di piani per il disassemblaggio dei nuovi edifici, la redazione di audit pre-demolizione prima di qualsiasi intervento che preveda la sostituzione di porzioni edilizie, il recupero del 70% in peso dei materiali e l'adozione dello strumento del piano di gestione dei rifiuti di cantiere, sostenendo il ricorso alla demolizione selettiva.

Waste materials
superuse and upcycling
in architecture: design
and experimentation

Abstract. The research programme on the implementation of circular economy in the built environment, whose urgency is acknowledged both at national and at EU level, works on two complementary approaches: reuse (*superuse*) and recycling (*upcycling*). The first, theoretical and applied to a pilot case, is one of the first attempts to transpose to Italy the waste materials *scouting* and harvest mapping process as part of the design project. The second, with the start-up Atlante Inerti Project, which, with EIT funds, experiments an original use of recycled aggregates for the production of urban furniture elements with additive 3D printing and prefabrication of vibration compressed concrete, developing mixes with convincing performances of interest for further applications in the building industry.

Keywords: Superuse; Upcycling; Building materials; Circular economy; Experimentation.

Introduction

The research and experimentation field of the Research Group (RG) develops the implementation of the circular approach to the built environment, by acknowledging the phase of building materials selection among the first steps of the design process. The identification of materials available on a local scale, in particular through the valorisation of waste coming from other sectors, is intended as a prerequisite for the project, in line with the demand for a drastic reduction in the consumption of raw materials in the construction sector. The research follows, in fact, the interpretative orientation introduced by Commoner on the *closing circle* (1971), reformulated in the *Cradle to Cradle* model which, by eliminating the very concept of waste, envisages that the precious nutrients contained in materials should shape

the project and define it (McDonough and Braungart, 2002). Moreover, the problem of the high environmental and socio-economic costs of raw materials consumption in buildings and the objective of closing production cycles, fundamental in delineating the ecological paradigm, arise as a priority for the relevance given by the EU to the circular economy processes applied to the construction sector, strategic for the volume of materials used and waste produced. Since 2008, the EU Dir. 98 on waste has set a target for increasing the rate of recovery of construction and demolition waste (C&D) that, by 2020, will have to be reused or regenerated in secondary raw materials (SRM) for at least 70% by weight. The *Roadmap to a Resource Efficient Europe* (2011) and the *Closing the loop* EU action plan (2015), strengthened in 2018 with amend-

Obiettivi del programma di ricerca: progettare la material resource efficiency in architettura

In questo quadro, le riflessioni e ricerche avviate da diversi anni dal GdR, con l'obiettivo di incrementare la *resource efficiency* innovando le modalità di selezione dei materiali, si dimostrano coerenti per l'approccio incentrato sulla circolarità del ciclo di vita dell'edificio/dei prodotti da costruzione e sulle interrelazioni con il ciclo del progetto e del processo edilizio. Le molteplici potenziali ricadute culturali e socio-economiche di tale approccio si indirizzano a più stakeholder (progettisti, produttori, costruttori, riciclatori, stazioni appaltanti pubbliche e private) poiché molti sono i soggetti coinvolti nell'attivazione di processi circolari. La ricerca tecnologica può contribuire al raggiungimento di due obiettivi: da un lato, con la definizione di modalità di approccio al progetto, procedure di selezione e *procurement* dei prodotti, tool per la raccolta ed organizzazione dei *data set* sui materiali, strumenti di supporto che favoriscano, tra gli attori del processo edilizio, un *decision making* mirato ad ottimizzare l'uso dei materiali sotto il profilo ambientale; dall'altro, con la sperimentazione applicata per l'ideazione e sviluppo di soluzioni tecniche che consentano di reintrodurre in edilizia i rifiuti da C&D evitando gli attuali processi di *downcycling* ed attivando filiere circolari locali. Il programma di lavoro più recente del GdR, avviato nel 2012 con l'obiettivo di individuare strategie ed opzioni tecniche praticabili in Italia, è stato impostato nella ricerca "Gestione efficace dei materiali da costruzione nel ciclo vita dell'edificio. Strumenti per la prevenzione, il riuso e il riciclo dei rifiuti da C&D"¹, sviluppata con il centro BRE (UK). Lo studio, in una prima fase, ha verificato le possibilità di trasferimento al contesto

ments to the waste and circular economy directives, stress the importance of cross-cutting tools, such as Green Public Procurement (GPP), in overcoming the market barriers in critical sectors like construction. Consistently, the H2020 *Work Programme 2018-2020 – Climate action, environment, resource efficiency and raw materials* – focuses on the role of circular economy practices in urban regeneration processes, on the enhancement of by-products and of the development of sustainable ways of processing, recovery, reuse and recycling construction materials. In Italy, despite virtuous regulations have been in place for 20 years (D.lgs. 22/1997), only since 2015 the recovery of C&D waste has become mandatory for interventions on public buildings, with the introduction of the Environmental Criteria for Building Design, Construction and Maintenance of the

Italian GPP NAP (National Action Plan on GPP), which are compulsory in accordance with the new Procurement Code. The Criteria require the use of products with recycled content, the production of disassembly plans for new buildings, the preparation of pre-demolition audits before any type of demolition, the recovery of 70% by weight of C&D waste and the adoption of the site waste management plan tool, while promoting the use of selective demolition.

Objectives of the research programme: design for material resource efficiency in architecture

In this context, the studies and researches conducted by the RG in the last years, with the aim of increasing resource efficiency by innovating the methods of selection, procurement and use of materials, are consistent

italiano delle best practice internazionali (*Designing out Waste, Design for Deconstruction*), sviluppandosi poi con diverse sperimentazioni quali la redazione di audit pre-demolizione finalizzati al riuso di componenti edilizi², l'applicazione e la validazione di software per la previsione e gestione dei rifiuti di cantiere³. La ricerca ha quindi condotto alla definizione di linee guida per la selezione e gestione dei materiali nell'intero processo edilizio, relazionate alle fasi del ciclo di vita dell'edificio e correlate ad un set di strumenti di supporto decisionale.

Il tema di ricerca, in seguito, ha trovato sviluppo da parte del GdR attraverso due diversi livelli di approfondimento teorico e sperimentale sui temi del riuso – inteso come *superuse*⁴ – prioritario e preferibile sotto il profilo ambientale, e del riciclo – inteso come *upcycling*⁵ – applicato in modo residuale agli scarti non riutilizzabili se non riprocessati, con attività di ricerca condotte in parte nel Dipartimento PDTA dell'Università "Sapienza" di Roma, in parte con il progetto della start up Atlante Inerti Project.

Superuse: il progetto tecnologico a partire dallo scouting di materiali di recupero

Il primo ambito di ricerca è riferito al processo di *scouting* dei materiali di scarto (Jongert et al., 2007) idonei all'uso in architettura (sottoprodotti, scampoli, prodotti difettati, giacenze d'inventuti, surplus di produzione, scarti di lavorazione, rifiuti da C&D, etc.) reperibili nell'area adiacente al sito d'intervento, entro una distanza limitata in media ad un raggio di 25 km, finalizzato alla creazione di *harvest map* come premessa al progetto. La sistematizzazione di tale fase nel processo è finalizzata alla valorizzazione progettuale degli scarti locali con azioni di *superuse* e, di conseguenza, alla ridu-

an environmental point of view; on the other hand, with experimentation applied to the design and development of technical solutions allowing to re-introduce C&D waste into buildings, avoiding the current *downcycling* processes and activating local circular supply chains.

The most recent work program of the RG, launched in 2012 with the aim of identifying strategies and technical options adoptable in Italy, has been set in the research "Eco-effective management of the life cycle of building materials. Tools for the prevention, reuse and recycling of C&D waste"¹, developed with the BRE centre (UK). The study, in a first phase, verified the possibility of transferring international best practices (*Designing out Waste, Design for Deconstruction*) to the Italian context; then it developed with different experiments such as the prepa-

Technological research can contribute to the achievement of two objectives: on the one hand, with the definition of: methodologies for approaching the project, selection and procurement procedures of products, tools for collecting and organizing data sets on materials, supporting tools favouring, among the stakeholders of the building process, a decision making aimed at optimizing the use of materials from

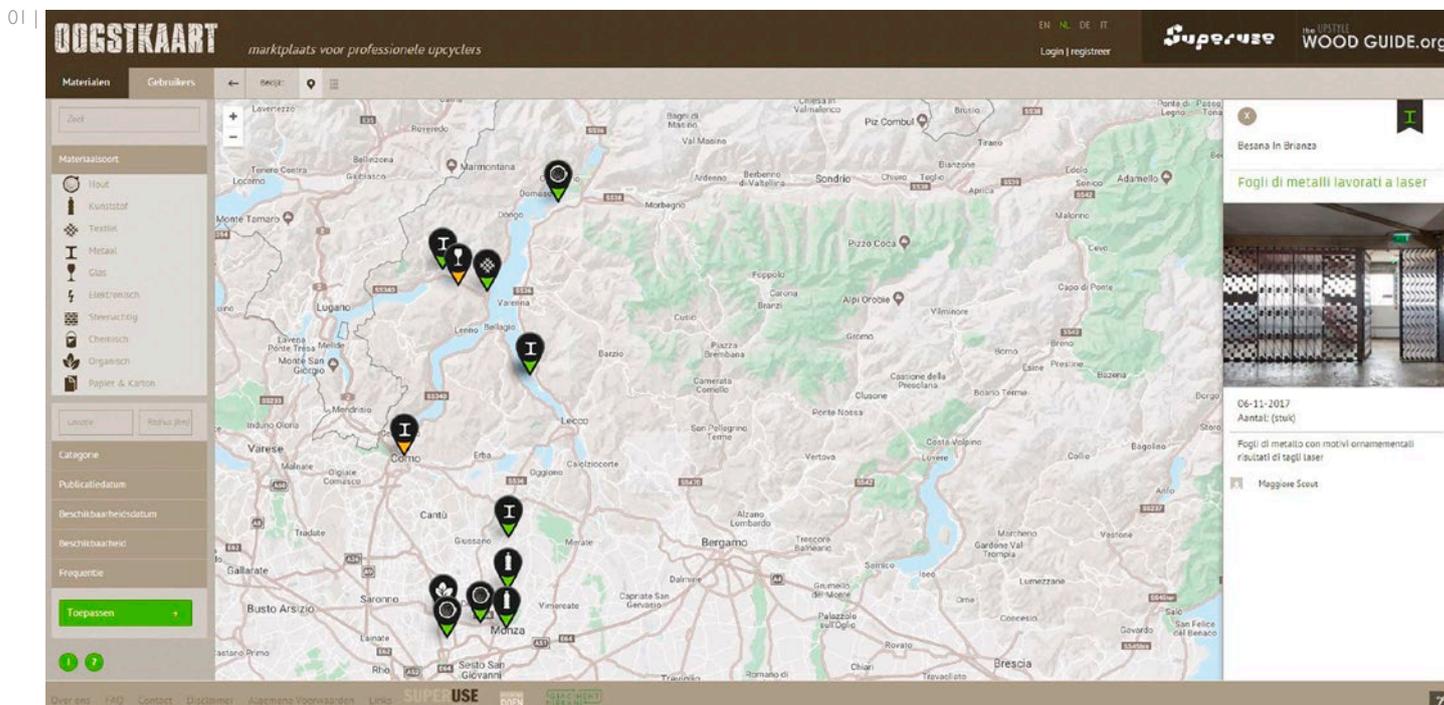
zione dell'energia incorporata nei materiali impiegati, all'eliminazione dei consumi e delle emissioni per la produzione e il trasporto di materiali "nuovi" ed all'attivazione di processi di economia circolare a piccola scala. Il GdR indaga, in particolare, le ricadute che un'anticipata mappatura dei materiali disponibili in situ attiva sul progetto, sia in termini di ottimizzazione nell'uso delle risorse, sia di caratterizzazione materica dell'architettura, e le potenzialità di trasposizione di questa strategia in un'opzione tecnica altamente replicabile.

L'approccio è stato approfondito attraverso una prima applicazione su Roma, nell'area del sito ex industriale Papareschi, nell'ambito di una Tesi di laurea avviata nel 2017 con il Politecnico di Torino⁶. Il progetto, finalizzato al recupero degli ex stabilimenti Miralanza con l'impiego di materiali di scarto reperiti in loco, ha applicato un processo che dalla fase di *scouting* ha portato alla creazione di una *harvest map*, alla ridefinizione di funzioni e spazi ed al progetto tecnologico di componenti edilizi con materie di recupero e reversibili.

La sperimentazione è stata applicata, quindi, ad un caso pilota (avviato a settembre 2017 e in fase di realizzazione) sviluppato dall'arch. Césare Peeren dello studio olandese Superuse Studios⁷ in collaborazione con il GdR. L'intervento ha visto la redazione di una *harvest map* nell'area tra Como e Milano (Fig. 1) per individuare, presso aziende locali, materiali di scarto che potessero essere impiegati nel recupero di una villa storica vincolata sul lago

di Como, realizzata in muratura portante in pietra con solai lignei. Indagini preliminari su base geografica, condotte da un team multidisciplinare⁸ per la selezione di aziende coinvolgibili, hanno permesso con successivi sopralluoghi di identificare e analizzare i materiali di scarto reperiti, al fine di comprendere le caratteristiche dei flussi di risorse non reintrodotti nei cicli produttivi propri o di altri soggetti. È stato possibile, quindi, comporre un database di risorse disponibili rilevando per ciascun *record* molteplici dati (categoria di scarto, tipologia di materiale, dimensioni, quantità e frequenza di produzione, prezzo). Sono stati selezionati materiali idonei all'impiego come stratificazioni dell'involucro e delle partizioni verticali e orizzontali dell'edificio storico e/o come componenti e materiali per le finiture e l'arredo quali: scarti di lavorazioni di tessuti (seta difettata e cimose tessili); sottoprodotti derivati dal taglio laser di lamiere metalliche; eccedenze di produzione di pannelli sandwich metallici; macchinari tessili in disuso, composti da diversi profilati metallici; scarti del processo produttivo di malte/resine per finiture. Si è, dunque, lavorato per coordinare la fase di approvvigionamento dei materiali, rapportandosi direttamente con le aziende produttrici degli scarti per definire aspetti procedurali ed economici per la fornitura.

Il progetto ha permesso, attraverso la collaborazione tra Superuse Studios e l'Associazione Giacimenti Urbani, l'apertura della pagina italiana del portale open source *Harvest Map*⁹.



La sperimentazione applicata all'upcycling dei rifiuti inerti in edilizia

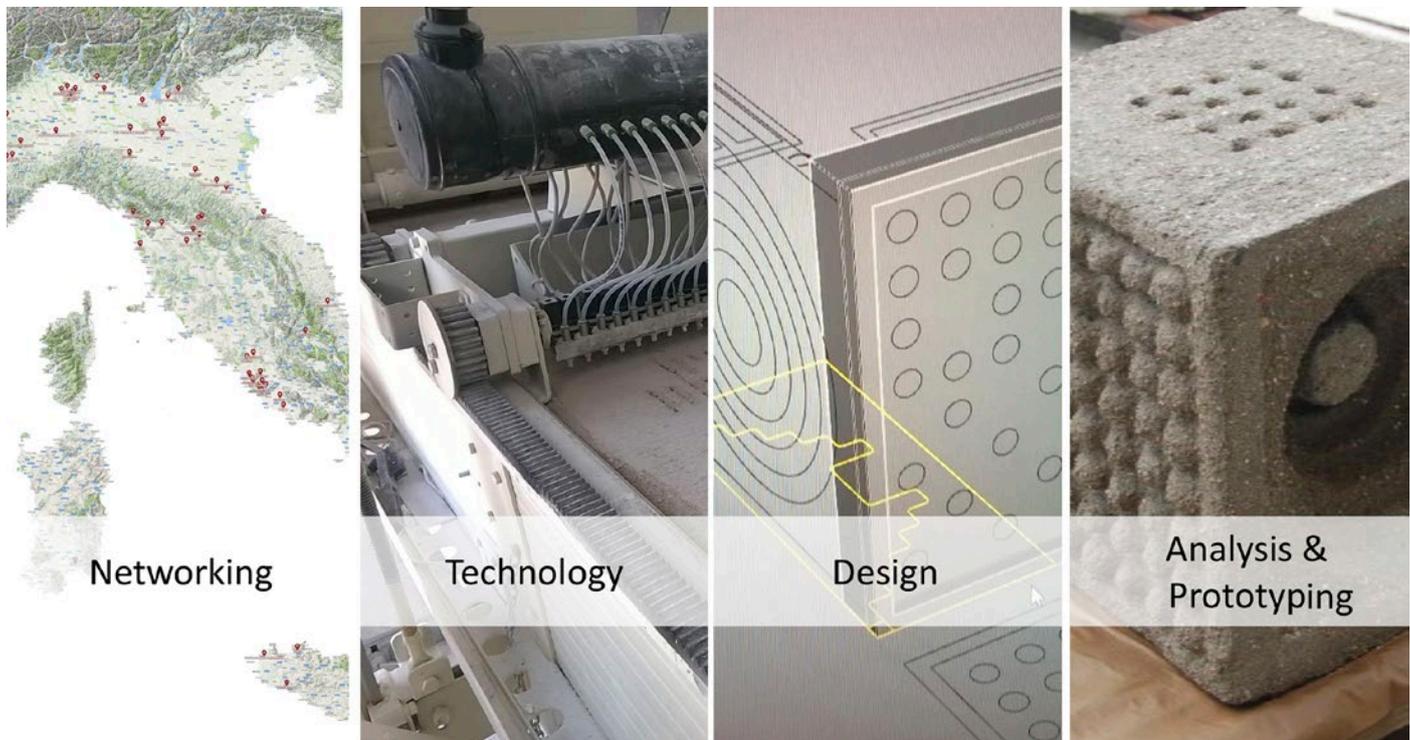
Il secondo ambito di ricerca nasce dall'obiettivo di affrontare, attraverso la strategia dell'upcycling, la complessa sfida del re-impiego in edilizia degli aggregati derivanti dal riciclo di rifiuti inerti misti da C&D. Gli inerti costituiscono in Italia circa l'80% delle oltre 52 milioni di ton. /anno di rifiuti prodotti in edilizia (ISPRA, 2017), un volume la cui quantificazione soffre una conclamata incertezza (FISE UNIRE, Fondazione per lo Sviluppo Sostenibile, 2017) dovuta ad una raccolta dati non capillare sul territorio nazionale, da cui sfuggono i volumi minimi ed i rifiuti gestiti in modo illegale. Gli inerti correttamente riciclati (circa il 70% in base ad alcune stime) sono impiegati prevalentemente in opere stradali e recuperi ambientali e, solo in misura molto limitata, in edilizia (riempimenti e sottofondi). In questo quadro si è sviluppato Atlante Inerti Project (AIP), progetto di informazione, ricerca e sviluppo da cui è derivato un progetto d'impresa, con l'obiettivo di promuovere usi innovativi degli inerti riciclati, attraverso la progettazione, sperimentazione e prototipazione di elementi di arredo urbano, in prima fase, e componenti edilizi in calcestruzzo. AIP ha elaborato una mappa geo-referenziata di fornitori di aggregati certificati sul territorio nazionale¹⁰, che evidenzia l'offerta e favorisce l'incontro con la domanda attraverso attività di networking tra produttori (impianti

di riciclaggio) e potenziali utilizzatori (industrie, imprese di costruzione). La piattaforma (Fig. 2), ideata nell'ambito del workshop "LOWaste for Action"¹¹ del progetto EU LIFE+ LOWaste (Ferrara 2013-2014), è il primo database specifico in Italia e nasce da un'attività di benchmarking che ha evidenziato l'importanza degli strumenti di informazione per identificare produttori qualificati di MPS e favorire il ricorso ai materiali recuperati. Il GdL, a supporto dell'AIP, ha intrapreso, dal 2016, attività di progettazione e prototipazione di manufatti in CLS ad alte prestazioni con l'uso esclusivo di aggregati riciclati, identificando le più idonee tecnologie standard ed innovative per una sperimentazione inedita in Italia. Le attività, finanziate da due bandi della *Climate-KIC* dello EIT (European Institute of Innovation & Technology)¹², si sono concretizzate in due diverse applicazioni che hanno dimostrato la fattibilità dell'impiego di sabbie riciclate per la produzione di manufatti prefabbricati in CLS, come illustrato di seguito.

L'impiego della sabbia riciclata nella stampa additiva 3D

La prima sperimentazione ha riguardato l'uso di aggregati riciclati nella stampa additiva 3D di grandi dimensioni, che impiega sabbia e leganti minerali per realizzare manufatti monolitici in conglomerato. Tale tecnica, sviluppata in Italia e coperta da brevetto¹³, permette di generare forme complesse, funzionali alla rea-

La prima sperimentazione ha riguardato l'uso di aggregati riciclati nella stampa additiva 3D di grandi dimensioni, che impiega sabbia e leganti minerali per realizzare manufatti monolitici in conglomerato. Tale tecnica, sviluppata in Italia e coperta da brevetto¹³, permette di generare forme complesse, funzionali alla rea-



Networking

Technology

Design

Analysis & Prototyping

lizzazione di componenti edilizi e manufatti per l'arredo urbano con forte valore estetico che possano conferire valore aggiunto alle MPS, con assenza di scarti nel processo produttivo ed impiego di un legante magnesico a bassa energia incorporata. Alla fase di sperimentazione con la stampante, impiegata per la prima volta da AIP con l'uso di sabbia riciclata da C&D¹⁴, è seguita una fase di caratterizzazione del conglomerato innovativo, con prove sperimentali svolte dal Laboratorio CertiMaC di Faenza (ENEA, CNR) su due campioni realizzati con legante magnesico e cementizio, al fine di valutare e confrontare i livelli di resistenza meccanica raggiungibili con la tecnica di stampa e l'uso di diversi leganti.

I risultati dei test (determinazione di massa volumica apparente, resistenza a flessione e compressione, modulo elastico e coefficiente di assorbimento d'acqua per capillarità) hanno evidenziato che il CLS realizzato è caratterizzato dall'anisotropia tipicamente conferita dal processo di stampa additiva. Il legante magnesico, migliore sotto il profilo ambientale, si è dimostrato meno performante del cemento, dal punto di vista meccanico, con resistenza a compressione in rapporto 1 a 4 (Fig. 3): il conglomerato legato con magnesio, arriva ad una resistenza a compressione pari a 7 MPa, a differenza del cementizio che raggiunge i 25 MPa. Il secondo conglomerato ha una classe di resistenza C20/25 (CLS ordinario – NSC), medio-alta, risultando impiegabile per diverse tipologie di manufatti (non strutturali, ai sensi del DM 17/01/2018, poiché la sostituzione degli aggregati naturali con riciclati nella miscela è pari al 100%).

Con il supporto della società proprietaria del brevetto D-Shape, si è poi realizzato un prototipo (cubico, di lato 60 cm, con 6 facce estremamente differenziate e modellate in 3D, utilizzabile come seduta o dissuasore) appositamente progettato per testare la resa

tecnica ed estetica della miscela in riciclato, con adozione del legante cementizio, per le sue maggiori potenzialità. Il processo di stampa ha seguito le fasi di miscelazione di aggregato e legante (sabbia riciclata 0-4 mm e cemento BASF Master Emaco A640); stampa del modello (Fig. 4a) in circa due ore e mezza; svuotamento del modello dalla sabbia non legata (Fig. 4b).

Il prototipo stampato (Fig. 4c) ha rappresentato un esito convincente sotto il profilo estetico e prestazionale. Il processo produttivo, tuttavia, si è dimostrato non completamente soddisfacente dal punto di vista realizzativo ed economico, in riferimento alle tempistiche e ai costi d'impiego della stampante, elevati a causa di alcuni aspetti non ancora risolti sul macchinario che comportano la necessità di supervisione di personale specializzato.

L'impiego degli aggregati riciclati in manufatti vibro-compresi

La seconda sperimentazione si è concentrata sulla produzione di manufatti modulari per l'arredo urbano prodotti con la vibro-

compressione del CLS, realizzato con 100% di aggregati riciclati, adottando la stessa sabbia utilizzata per la stampa 3D. Infatti, su richiesta del produttore della sabbia Ricoeso, il GdL ha progettato un sistema di moduli triangolari componibili per sedute, fioriere, recinzioni, impiegabili anche come elementi per pavimentazioni autobloccanti, con particolare cura nel design di prodotto.

Dopo la fase di progettazione, il GdL ha curato lo sviluppo e caratterizzazione del mix del conglomerato più idoneo per realizzare i moduli. Con la consulenza di un Laboratorio specializzato¹⁵ sono state svolte attività di identificazione delle esigenze per la produzione industriale di moduli per manufatti di arredo urbano; prelievo, analisi e caratterizzazione di sabbia riciclata e

ration of pre-demolition audits aimed at the reuse of building components² as well as the application and validation of software for the forecasting and management of C&D waste³. The research has therefore led to the definition of guidelines for the selection and management of materials throughout the building process, related to the phases of the building life cycle and related to a set of decision supporting tools.

The research topic, thereafter, has been developed by the RG through two different levels of theoretical and experimental analysis on the issues of reuse – interpreted as *superuse*⁴ – overriding and preferable from an environmental point of view, and recycling – understood as *upcycling*⁵ – applied in a residual way to non-reusable waste, with research activities conducted in part at PDTA Dep. of Sapienza University of

Rome, in part with the start-up Atlante Inerti Project.

Superuse: architecture technological design starting from waste materials scouting

The first research area refers to the *scouting* process of waste materials (Jongert et al., 2007) suitable for use in architecture (by-products, defective products, dead stock, leftovers, processing waste, C&D waste, etc.) available in the area adjacent to the intervention site, within a limited distance – on average a radius of 25 km, aimed at creating a *harvest map* as a precondition for the project. The systematization of this phase in the process is aimed at the enhancement of local waste by design with actions of *superuse* and, consequently, at the reduction of the energy embodied in the materials, at the elimination

of consumptions and emissions for the production and transportation of “new” materials, as well as at the activation of small-scale circular economy processes. The RG investigates, in particular, the effects that an early mapping of the materials available in situ activates on the project, both in terms of optimization of the use of resources and of the material characterization of architecture, as well as the potential for transposing this strategy into a highly repeatable technical option.

The approach was investigated through a first application on Rome, in the area of the former industrial site Papareschi, within a degree thesis launched in 2017 with the Politecnico of Turin⁶. The project, aimed at the recovery of the former Miralanza factory on site, has applied a process that from the *scouting* phase led to the creation

of a *harvest map*, to the redefinition of functions and spaces and the technological project of reversible building components with reclaimed materials. The experimentation was then applied to a pilot case (started in September 2017 and under construction) developed by the architect Césare Peeren from the Dutch atelier Superuse Studios⁷ in collaboration with the RG. The intervention saw the preparation of a *harvest map* in the area between Como and Milan (Fig. 1) to identify, among local companies, waste materials that could be used in the recovery of a historic Villa on the Lake Como, a listed buildings constructed with load bearing stone masonry and wooden floors. Preliminary geographic based researches, conducted by a multidisciplinary team⁸ for the selection of potentially interested companies, have allowed – with the following surveys



Summary of the results of the tests carried out on the sample of concrete produced using magnesium (binder) and 0-4 mm recycled sand.			
	U/M	Direction 1	Direction 2
Density	kg/m ³	1.556	1.581
Bending strenght	MPa	1,45	3,96
Compressive strenght	MPa	7,03	6,55
Longitudinal modulus of elasticity E	GPa	5,148	–
Shear modulus of elasticity G	GPa	2,092	–
Poisson's ratio	–	0,231	–
Water capillary absorption coefficient	kg/m ² min 0.5	1,18	0,96



Summary of the results of the tests carried out on the sample of concrete produced using BASF Master Emaco A640 cement and 0-4 mm recycled sand.			
	U/M	Direction 1	Direction 2
Density	kg/m ³	1.598	1.598
Bending strenght	MPa	1,71	3,64
Compressive strenght	MPa	7,87	25,1
Longitudinal modulus of elasticity E	GPa	4,74	11,79
Shear modulus of elasticity G	GPa	1,98	4,99
Poisson's ratio	–	0,197	0,173
Water capillary absorption coefficient	kg/m ² min 0.5	0,64	0,75

03 | Risultati delle prove sperimentali su due campioni di conglomerato con sabbia riciclata prodotti con stampante 3D, Laboratorio CertiMaC
Results of the experimental tests on two samples of concrete with recycled sand produced with 3D printer, CertiMaC Laboratory

– to identify and analyse the waste materials, in order to understand the characteristics of the flows of resources not reintroduced in the production cycles of the same or of other companies. Thus it was possible to compose a database of available resources, noticing multiple data for each *record* (waste category, type of material, size, quantity and frequency of production, price). Then, among these materials, the ones suitable for use as integrative layers of the envelope and of the vertical and horizontal partitions of the historic building and/or as components and materials for finishes and furnishings were selected: fabric processing waste (defective silk and textile selvages); by-products derived from laser cutting of metal sheets; surplus production of metal sandwich panels; disused textile machinery, composed of various metal profiles; waste from the production

process of mortars/resins for architectural finishes. Then, an intense work was needed to coordinate the procurement phase of the materials, dealing directly with the companies producing the selected materials, in order to define procedural and economic aspects for the supply.

The project has allowed, through the collaboration between Superuse Studios and the Giacimenti Urbani Association, the opening of the Italian page of the open source portal *Harvest Map*⁹.

Experimentation applied to the up-cycling of inert waste in the building sector

The second area of research arises from the objective of addressing, through the strategy of *upcycling*, the complex challenge of reintroducing the aggregates deriving from the recycling of mixed inert C&D waste in

the construction sector. In Italy, inert waste represents about 80% of the 52 million tons. of C&D waste produced each year (ISPRA, 2017), a volume whose quantification suffers a recognized uncertainty (FISE UNIRE, Fondazione per lo Sviluppo Sostenibile, 2017) due to a non-widespread data collection on the national territory, which leaves out small volumes and illegally managed waste. The correctly recycled aggregates (about 70% based on some estimates) are mainly used in road works and environmental recoveries and, only to a very limited extent, in constructions (fillings, bases).

In this framework, Atlante Inerti Project (AIP) was developed, an information, research and development project from which a business project was derived, with the aim of promoting innovative uses of recycled aggregates, through the design, testing and proto-

typing of concrete urban furniture elements, in the first phase, and building components. AIP has developed a geo-referenced map of certified aggregate suppliers in the national territory¹⁰, drawing attention to the supply and encouraging the meeting with demand through networking activities between producers (recycling plants) and potential users (industries, construction companies). The platform (Fig. 2), conceived within the workshop “LO-Waste for Action”¹¹ of the EU LIFE+ LOWaste Project (Ferrara 2013-2014), is the first specific database in Italy and derives from a benchmarking activity highlighting the importance of information tools to identify qualified SRM producers and to encourage the use of reclaimed materials.

Since 2016, the AIP Working Group (WG) has undertaken design and prototyping activities on high-perfor-



04 | Le fasi della prototipazione con stampante additiva 3D in sabbia riciclata: stampa (a), rimozione sabbia non legata (b), prototipo pronto per le rifiniture manuali (c), foto del GdL di AIP

Prototyping phases with additive 3D printer in recycled sand: printing (a), unbound sand removal (b), prototype ready for manual finishing (c), photo by AIP WG

di equivalente materiale naturale per un confronto sul prodotto finale; progettazione dei mix con impasti in laboratorio, per produrre i campioni da sottoporre a prove; valutazioni con test e misurazioni (misure su malta e/o CLS fresco; resistenza meccanica a varie stagionature; resistenza a flessione; misura del ritiro).

I risultati della caratterizzazione (Fig. 7), che per un mix in particolare hanno rivelato il raggiungimento di una resistenza a compressione pari a 34,5 MPa, hanno dimostrato l'idoneità del conglomerato vibro-compresso, con classe di resistenza C25/30, all'impiego in diverse tipologie di manufatti, non strutturali, con prestazioni più elevate rispetto al CLS ottenuto con stampa 3D. La sperimentazione si pone, quindi, come premessa concreta e validata per lo sviluppo di ulteriori applicazioni degli inerti da C&D per la produzione di manufatti ad elevato valore estetico e prestazionale. Un'attenta ricerca sulla texture, testando l'impiego di pigmenti nell'impasto o integrati dopo l'asciugatura del conglomerato e sperimentando trattamenti superficiali alternativi (disattivazione chimica del legante, levigatura e rigatura della superficie) (Fig. 5), ha sollecitato la riflessione su potenziali applicazioni del mix in componenti edilizi di finitura.

La fase di prototipazione degli arredi urbani (Fig. 6) ha permesso ad AIP di valutare diverse tipologie di assemblaggi possibili dei moduli triangoli, alcuni esposti alla Maker Faire Rome¹⁶.

Risultati, limiti e sviluppi futuri della ricerca

Le attività di ricerca in corso sul *superuse* permettono di rilevare che il progetto con le materie di recupero sta sviluppando un lessico evolutivo rispetto alle pionieristiche esperienze del primo decennio del Duemila. L'affina-

mance CLS products with the exclusive use of recycled aggregates, identifying the most suitable standard and innovative technologies for this unprecedented experimentation in Italy. These activities, financed through two calls of the EIT (European Institute of Innovation & Technology) *Climate-KIC*¹², resulted in two different applications, demonstrating the feasibility of using recycled sand for the production of prefabricated concrete products, as described below.

The use of recycled sand in 3D additive printing

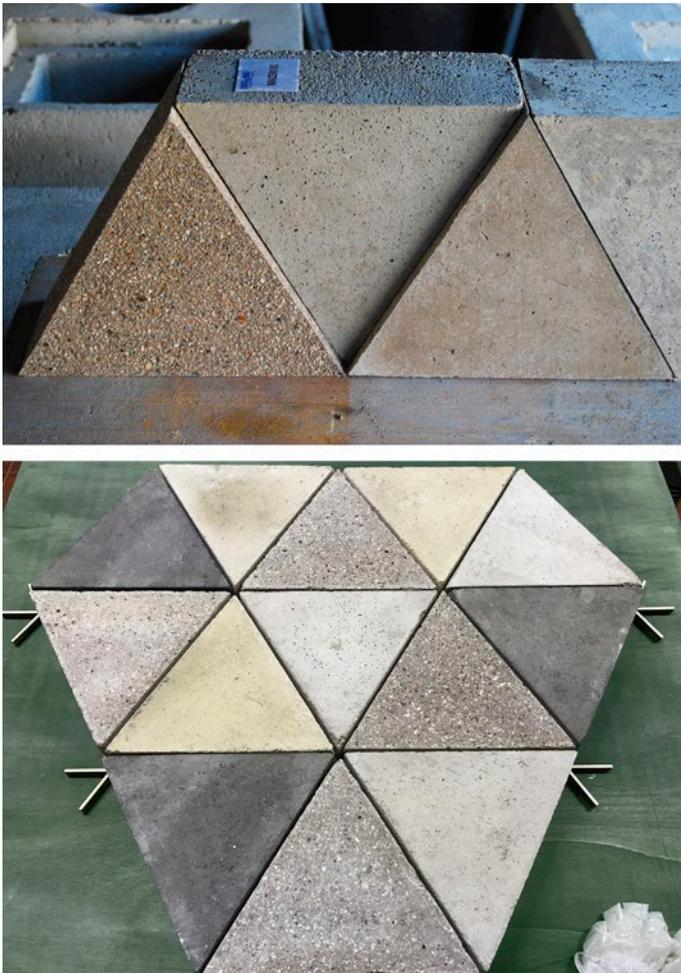
The first experimentation involved the use of recycled aggregates in a large 3D additive printer, which uses sand and mineral binders to make monolithic concrete products. This technique, developed in Italy and covered by patent¹³, makes it possible to generate

complex forms, functional to the construction of building components and urban furniture elements with high aesthetic value, giving added value to the SRM, with no waste in the production process and using a low embodied energy magnesium binder. After the experimentation phase with the printer, used for the first time by AIP with a recycled sand from C&D¹⁴, a phase of characterization of the innovative concrete was carried out with experimental tests developed by the CertiMaC Laboratory in Faenza (ENEA, CNR) on two samples made with a magnesium and cementitious binder. The objective was to evaluate and compare the mechanical resistance levels achievable with the printing technique applied to recycled aggregates with the use of two different binders. The results of the tests (determination of apparent density, resistance to bend-

ing and compression, modulus of elasticity and water capillary absorption coefficient) show that the concrete is characterized by the anisotropy typically conferred by the additive printing process. The magnesium binder, preferable from the environmental point of view, proved to be less efficient than cement in terms of mechanical properties, with a compressive strength in the ratio 1 to 4 (Fig. 3): the magnesium bonded concrete proved to have a compressive strength of 7 MPa, while the cement reached 25 MPa. The second mix has a medium-high strength class (C20/25, NSC - Normal Strength Concrete), and can be used for different types of products (non-structural, in compliance with DM 17/01/2018 - Technical Construction Standards - since the replacement of natural aggregates with recycled in the mix is at a 100% rate).

With the support of the company owner of the D-Shape patent, AIP then created a prototype (cubic with a side of 60 cm, with 6 extremely differentiated 3D-shaped faces, conceived as a bench or a bollard), specifically designed to test the technical and aesthetic performance of the recycled concrete, adopting the cement binder for its greater potential. The printing process followed the following phases: mixing of aggregate and binder (0-4 mm recycled sand and BASF Master Emaco A640 cement); printing of the model (Fig. 4a) in about two and a half hours; emptying the model from unbound sand (Fig. 4b).

The prototype (Fig. 4c) represents a convincing result in terms of aesthetics and performance. The printing process, however, has proved to be not completely satisfactory from the production and economic point of view:

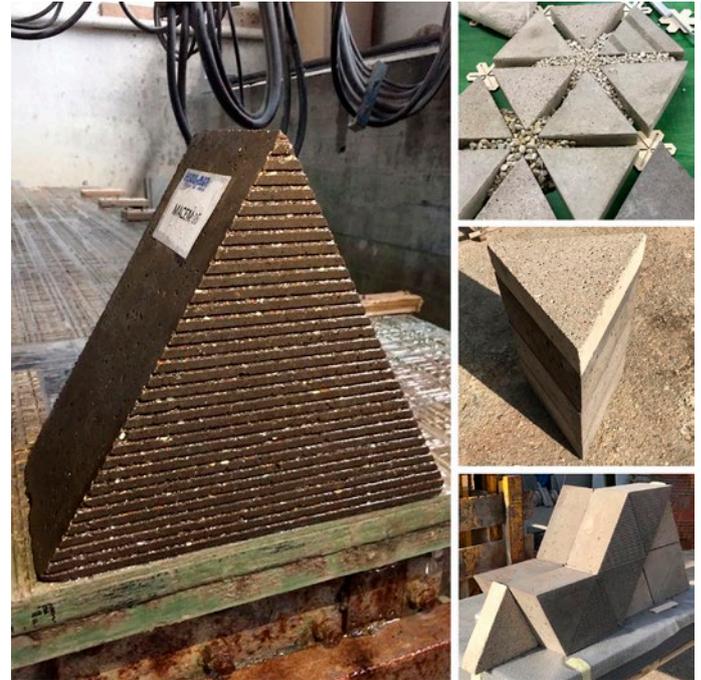


05 | Finiture superficiali e accostamento dei moduli in CLS vibro-compresso con riciclato, foto del GdL di AIP

Surface textures and combination of the vibrated precast recycled concrete modules, photo by AIP WG

06 | Finiture superficiali e modalità di assemblaggio dei moduli in CLS vibro-compresso con riciclato in pavimentazioni drenanti, dissuasori, panchine, foto del GdL di AIP

Surface textures and assembly modalities of the vibrated precast recycled concrete modules in draining outdoor pavers, bollards, benches, photo by AIP WG



mento dei processi di *scouting* con il supporto di tool informatici adeguati, porterà a una maggiore integrazione di tale fase con gli strumenti del progetto che permetteranno alle sperimentazioni architettoniche e tecnologiche di seguire un processo di “normalizzazione” per uscire dalla “logica della prova” attraverso la de-

finizione di un metodo processuale.

Le sperimentazioni sull'*upcycling* degli inerti mostrano limiti nell'applicabilità del processo di stampa 3D ad ampia scala, legati a tempi e costi di produzione, che potranno essere superati con la messa a punto delle stampanti ed il loro impiego

the duration and costs of the production technique are still too high, due to some aspects not yet resolved in the equipment, entailing the need for supervision by specialized workers.

The use of recycled aggregates in vibrated precast concrete products

The second experimentation focused on the production of modular elements for urban furniture, produced with vibration compressed concrete, made with 100% recycled aggregates, using the same sand adopted for the 3D printing test. In fact, at the request of the producer of the sand Ricoeso, the AIP WG created a system of triangular modules suitable for use as benches, planters, fences, as well as interlocking pavers, paying particular attention in product design.

After the design phase, the WG coordinated the development of the mix

design and characterization of the concrete for the modules. With the support of a specialized laboratory¹⁵ a series of activities were carried out: identification of the needs for the industrial production of modules for urban furniture; collection, analysis and characterization of the recycled sand and of a natural equivalent material, for a comparison on the final product; mix design with production of samples to be tested in laboratory; assessment with tests and measurements on mortar and/or fresh concrete concerning compressive strength at different drying times, bending strength, shrinkage).

The characterization's results (Fig. 7), which for a particular mix revealed the achievement of a compressive strength equal to 34.5 MPa, show the suitability of the vibration compressed concrete, with strength class C25/30, for the

use in different types of products, not structural, with higher performances compared to the concrete obtained with 3D printing. The experimentation therefore represents a tangible premise for the development of further applications of recycled aggregates from C&D for the production of prefabricated component with a high aesthetic and performance value. Furthermore, an in-depth research on the concrete surface texture, testing the use of pigments in the mixture or their application after the drying phase, as well as alternative surface treatments (chemical deactivation of the binder, sanding and lining of the surface) (Fig. 5), encouraged additional investigations on potential applications of the mix in building components suitable for use as finishes.

The prototyping phase of the urban furniture elements (Fig. 6) allowed

AIP to evaluate different types of possible assembly of the triangular modules, some of which were exposed to the Maker Faire Rome¹⁶.

Results, limits and future research developments

The research activities in progress on *superuse* allow to point out that architectural design with reclaimed materials is developing an evolutionary vocabulary, with respect to the pioneering experiences of the first decade of the 21st century. The refinement of *scouting* processes, with the support of appropriate IT tools, will lead to a greater integration of this phase with the project steps. This will allow architectural and technological experimentation to follow a “normalization” process, in order to get out of the “test logic” through the definition of a processual method.

nell'impianto di produzione di aggregati riciclati, da valorizzare in manufatti dalle forme complesse, anche di grandi dimensioni, realizzati in loco, abbattendo costi ed emissioni dovuti al trasporto e limitando il prezzo del prodotto finale. Ulteriore applicazione può aprirsi all'intervento di restauro per realizzare componenti reversibili e compatibili, nelle lacune di elementi architettonici ripetuti (stampabili in 3D sulla base del modello da laser scanner). La sperimentazione sulla prefabbricazione richiede, invece, uno sviluppo in termini di analisi di fattibilità economica, anche in rapporto agli spazi necessari per gli impianti di vibro-compressione da installare presso gli impianti di riciclaggio. I risultati della ricerca, in conclusione, aprono ad applicazioni sui componenti edilizi (lastre per facciate ventilate, pavimentazioni, etc.) *customizzati* in termini di mix design e relative prestazioni del conglomerato, texture superficiali del prodotto, nonché di articolazione della filiera produttiva.

NOTE

¹ La ricerca è stata sviluppata nella tesi di dottorato in Progettazione Ambientale, XXV ciclo, di P. Altamura presso il Dip. PDTA di Sapienza Università di Roma, con la supervisione di S. Baiani ed E. Cangelli, confluita nella pubblicazione "Costruire a zero rifiuti. Strategie e strumenti per la prevenzione e l'upcycling dei materiali di scarto in edilizia", FrancoAngeli, Milano, 2015.

² Kelvin Hall School, Hull (UK).

³ SmartWaste, <http://www.smartwaste.co.uk/>.

⁴ Approccio progettuale che ricerca materiali scartati, dissipandone l'utilità, e ne legge le potenzialità di riuso, facendo in modo che le loro caratteristiche diventino un valore aggiunto per nuovi prodotti o edifici.

⁵ «The practice of recycling material in such a way that it maintains and/or accrues value over time (the opposite of downcycling)». Glossario EPEA, <http://epea-hamburg.org/index.php>.

⁶ Stud. E. D'Alessandro, "MI.REUSE, progetto di riqualificazione di un'area ex industriale di Roma con materiali e componenti derivanti da processi di recupero" (2018), relatore R. Giordano, co-relatori S. Baiani, P. Altamura.

07 | Summary of the results of the tests carried out on 4 samples of concrete produced using cement (binder) and 0-4 mm recycled sand.

	U/M	MIX 01	MIX 02	MIX 03	MIX 04
Recycled aggregate (0-4 mm sand)	Kg	1.385	1.307	1.295	1.170
Cement 42,5 R	Kg	325	525	335	531
Additive	Kg	5,3	8,5	7,2	11,5
Water	Kg	166	167	194	202
Water - cement ratio	%	0,51	0,32	0,58	0,38
Voids	Lt	79	46	88	160
Density	kg/m ³	1.881	2.008	1.831	1.915
Spreading	mm	250	210	400	420
Compressive strength (100 mm concrete testing cube)					
1st day	MPa	3,2	11,6	2,9	9,1
2nd day	MPa	6,3	17,6	3,1	14,6
3rd day	MPa	8,1	18,5	6,3	17,9
4th day	MPa	8,9	19,2	6,7	19,1
7th day	MPa	11,2	27,8	9,9	23,6
14th day	MPa	14,7	32,8	12,8	24,7
28th day	MPa	16,5	34,5	13,8	26,2
Compressive/Bending strenght (160x160x40mm concrete testing parallelepiped)					
Bending strenght - 28th day	MPa	3,5	5,1	2,4	4,6
Compressive strenght - 28th day	MPa	16,7	29,6	12,7	26,6



⁷ Già 2012 Architecten, <http://superuse-studios.com/>.

⁸ Il team, coordinato da C. Peeren, ha visto la collaborazione di P. Altamura, E. Saturno (designer), D. Guzzo (documentarista) e degli studenti del Corso di Perfezionamento *Riuso Temporaneo* della docente I. Inti (Politecnico di Milano).

⁹ Si veda: <https://www.oogstkaart.nl/>.

¹⁰ AIP è un progetto degli arch. P. Altamura, G. Chiummiento e M. Cutini, <http://atlanteinertproject.yolasite.com/>.

¹¹ Si veda: <http://www.lowaste.it/wp/wp-content/uploads/2014/03/S4-caliri.pdf>.

¹² Programma *Climate-Kic StartUp Accelerator Italy 2016*, gestito per l'Italia dall'ASTER.

¹³ Si veda: <http://dshape.com/>.

¹⁴ Sabbia Ricoeso 0-4 mm prodotta a Roma da Eco Logica 2000 Srl, <http://www.ricoeso.it/>.

¹⁵ Conselab, <http://www.conselab.it/>.

¹⁶ Il progetto ha vinto il Premio *Maker of Merit 2017*.

REFERENCES

Addis, B. (2005), *Building with reclaimed components and materials*, Earthscan, London, UK.

Antonini, E. (2004), "La gestione dei residui dei processi di costruzione e demolizione", in Lucarelli, M.T. (Ed.), *Nuovi scenari per gli obiettivi di sostenibilità in edilizia. Il contributo del management ambientale. Atti di un percorso formativo*, Falzea, Reggio Calabria, pp. 179-182.

Commissione Europea - DG Growth (2016), "Protocollo UE per la gestione dei rifiuti da costruzione e demolizione", available at: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/20509/attachments/1/translations/.../native> (accessed: 5 April 2018).

The experiments on the *upcycling* of aggregates show limitations in the applicability of the large-scale 3D printing process, due to production duration and costs. These might be overcome by setting up and using the printers directly at the recycling facility, in order to *upcycle* the aggregates in products of complex shapes, even of large dimensions, made on site, reducing costs and emissions due to transportation and limiting the price of the final product. A further implementation can be envisaged in the restoration interventions, to realize reversible and compatible components, to fulfill the gaps of repeated architectural elements (printable in 3D on the basis of the laser scanner model). On the other hand, the experimentation on prefabrication requires a development in terms of analysis of economic feasibility, also in relation to the spaces

necessary the installation of vibration plants at the recycling plants. The research results, in conclusion, open to applications to building components (slabs for ventilated façades, floors, etc.) customized in terms of mix design and relative performance of the concrete, surface textures of the product, as well as articulation of the production chain.

NOTES

¹ The research has been developed by P. Altamura within the PhD dissertation in Environmental Design, 25th cycle, at PDTA Dep. of Sapienza University of Rome, tutors S. Baiani and E. Cangelli, and published in the book "Costruire a zero rifiuti. Strategie e strumenti per la prevenzione e l'upcycling dei materiali di scarto in edilizia", FrancoAngeli, Milan, 2015.

² Kelvin Hall School, Hull (UK).

Commoner, B. (1971), *The Closing Circle: Nature, Man & Technology*, Knopf, USA.

Cumo, F., Sferra, A. e Pennacchia, A. (2015), *Uso, disuso, riuso. Criteri e modalità per il riuso dei rifiuti come materiale per l'edilizia*, FrancoAngeli, Milan.

Davis Langdon, L.L.P. (2010), "Designing out Waste: a design team guide for buildings", WRAP, available at: <https://www.modular.org/marketing/documents/DesigningoutWaste.pdf> (accessed: 5 April 2018).

FISE UNIRE and Fondazione per lo Sviluppo Sostenibile (2017), "Rapporto Italia del Riciclo", available at: <https://www.fondazioneviluppосostenibile.org> (accessed 5 April 2018).

Gangemi, V. (Ed.) (2004), *Riciclare in architettura. Scenari innovativi della cultura del progetto*, Clean, Napoli, IT.

Giordano, R., Montacchini, E. (2012), "SUPER «Super Use of Products for Ecological Reclaims»: studi, sperimentazioni e soluzioni tecnologiche", in *Atti del Convegno Abitare il nuovo/abitare di nuovo ai tempi della crisi*, UniNa Federico II, pp. 1710-1720.

Hobbs, G. (Ed.) (2011), *Construction Waste Reduction around the World*, CIB Publication 364, Working Commission W115.

ISPRA (2017), "Rapporto Rifiuti Speciali", No. 264.

Jongert, J., Peeren C. and Van Hinte, E. (2007), *Superuse: Constructing New Architecture by Shortcutting Material Flows*, Oio Publishers, Rotterdam, NL.

Legambiente (2017), "100 materiali per una nuova edilizia", Rapporto dell'Osservatorio Recycle, available at: <https://www.legambiente.it> (accessed: 5 April 2018).

Longo, D. (2007), *Decostruzione e riuso. Procedure e tecniche di valorizzazione dei residui edilizi in Italia*, Alinea, Florence.

McDonough, W. and Braungart, M. (2002), *Cradle to cradle: remaking the way we make things*, North Point Press, New York, USA.

³ SmartWaste, <http://www.smartwaste.co.uk/>.

⁴ Design approach based on the search of discarded materials, whose usefulness has been wasted, aiming to identify their reuse potentialities and turn their features into an added value for new products and buildings.

⁵ «The practice of recycling material in such a way that it maintains and/or accrues value over time (the opposite of downcycling)». EPEA glossary, <http://epea-hamburg.org/index.php>.

⁶ Student E. D'Alessandro, "MLRE-USE, regeneration design of a former industrial site in Rome by components and materials from reusing processes" (2018), mentor R. Giordano, co-mentor S. Baiani, P. Altamura.

⁷ Formerly 2012 Architecten, <http://superuse-studios.com/>.

⁸ The team, coordinated by C. Peeren, has seen the collaboration of P. Alta-

mura, E. Saturno (designer), D. Guzzo (documentary film maker) and of the students of the *Riuso Temporaneo* Masterclass held by I. Inti (Politecnico di Milano).

⁹ See: <https://www.oogstkaart.nl/>.

¹⁰ AIP is a project by architects P. Altamura, G. Chiummiento e M. Cutini, <http://atlanteinertproject.yolasite.com/>.

¹¹ See: <http://www.lowaste.it/wp/wp-content/uploads/2014/03/S4-caliri.pdf>.

¹² *Climate-Kic StartUp Accelerator Italy 2016* Programme, managed for Italy by ASTER.

¹³ See: <http://dshape.com/>.

¹⁴ Ricoeso recycled sand 0-4 mm, produced in Rome by Eco Logica 2000 Srl, <http://www.ricoeso.it/>.

¹⁵ Conselab, <http://www.conselab.it/>.

¹⁶ The project won the *Maker of Merit 2017* Award.