

THE USE OF RECYCLED MATERIALS FOR SUSTAINABLE CONSTRUCTION SYSTEMS

Abstract

At the end of the 1980s, ecology for quality of life and human health came to public awareness. In a survey carried out in the European Community (limited to just 12 countries) in 1982, Italy became aware of the deterioration of the countryside, environmental and noise pollution, and waste disposal. It is waste management precisely that led to the scientific study into the recycling of waste into construction materials, and also of C&D procedures through the development of the selective demolition of buildings. Components for concrete such as glass foam spheres, deriving by the expansion treatment of glass scraps, high impact polystyrene HIPS, undifferentiated plastic microspheres for asphalt, light partition blocks by the compacting of plastic bags, treatment of paper and tetrapack wrappers, such as newspaperwood and other panels made by cellulose fibers with specialized performance levels. The deductions of this discussion are aimed at critically evaluating the applicability of the experiments underway.

Keywords: *ecology, concretes, waste, recycling, selective demolition.*

Introduction

In the last decade of the twenty-first century, Italians (as well as people in other countries) became aware that a radical rethinking of the relationship between ecology and economic was necessary. The terms of this relationship differed greatly from previously, when environmental protection costs were seen as an inevitable expense, although one that was a disincentive to the country's economical and social growth. This is added to the fact that the environment was a resource with a high economic value that should be increased by identifying pollution as an external diseconomy. In this sense, economists discussed how to scientifically evaluate the utility of environmental wellbeing that the quantitative estimates of the per capita product acquired at the time were not able to provide. This meant considering ecological deterioration in terms of the cost of the loss of natural resources, and the resulting investment for their reconstruction must be borne by the collective to achieve the quality of the services obtained from the water, air, land that constitute the environmental assets themselves. In the twenty-first century, the debate has led to the increased use of recycling of solid waste which has seen, among other things, an effect in the construction industry for the packaging of cement conglomerates characterised by mix designs using recycled aggregates.

Environmental engineering

It is from this social perspective that a policy and an environmental engineering technique, based on culture and awareness in relation to the economy and sociology, have been pragmatically developed on a single quantum set, characterised by the government of the environmental systems such as planning in the design phase and controls in the operational phase.

These considerations lead us to the case of Gothenburg, the Swedish city of 500,000 inhabitants with major problems with regard to the supply of heating sources. The city was able to resolve the issue not by upgrading the heating centres, which would have seen a huge increase in spending on oil expenditure, nor by orientating buildings according to the solar axis, nor through solar panels, but through the recycling of non-conventional sources. In practice, district heating was adopted for 85% of the total needs of approximately 150,000 inhabitants, with only the remaining 15% coming from the burning of natural gas and oil. Specifically, 33% of the waste heat from two refineries situated close to the city was used, 26% of the heat was obtained from the municipal waste incineration plant, 6% from cogeneration plants supplied by combustible fossil fuels, and 4% from a cogeneration plant supplied by the biogas obtained from digesting the solid sediment deposited on the bottom of the sewage water tanks. Lastly, the water waste from the sewage plant from showers, washing machines and sinks is recycled after purification. This entire procedure, together with an effective design of building shells to limit heat loss, enables an annual saving of 9,000 MWh of electrical energy. Gothenburg is not the only significant example of how sustainable design practices can be used by recycling materials destined for disposal. The same concept of sustainability contains parameters for reuse that are comparable to those of the other large strands, such as the use of renewable energy sources. Rather, the two ways are heavily interlinked, giving rise to a technology created by combining the characteristics of both to achieve an innovative, but in itself already existing method according to the concept of poetic technical regeneration.

Waste recycling for the production of construction materials

Recycling is assuming an increasingly important role, expanding into a greater number of production contexts, including construction. In particular, the problem of where to put the rubble from the demolition of

public works, which is continually growing following the restoration of existing buildings and adjusting them to their new residential requirements. This is in contrast to the gradual depletion of the space available for the location of landfills, which is making the disposal of these waste materials increasingly difficult and onerous. It is therefore evident how recycling materials from demolition is not able to simply constitute a solution to the problem tied to the huge volumes of waste to be disposed of in landfills, but also an alternative way of consuming non-renewable natural resources [1]. The European Community has issued statistical data concerning the annual production of waste from demolition and construction (C&DW, Construction and Demolition Waste) and its related reuse in each member state. In spite of doubts concerning the reliability and the realism of the data, which is official and does not therefore include the enormous amounts of illegally disposed of materials, differences in behaviour between the behaviour of the Northern European countries, which are more predisposed to the recycling of rubble, probably also due to the scarcity of natural resources, and the Southern European countries, where there is a markedly lower percentage of reuse and aimed at specific applications, perhaps also due to the possibility of the uncontrolled intensive exploitation of natural resources. However, a positive trend can be identified in the situation of the individual member states and in Europe, which brings to light significantly differentiated behaviours in the last decade between the Northern European countries, which have already met the targets set by the European directive (70%), and the predominantly Central European countries which are more or less approaching this objective (40-70%). In particular, it has been estimated that only 10% of the large amounts of inert waste produced annually in Italy is recyclable material, a somewhat low percentage considering that the annual production of this type of waste hovers around 40 million tonnes from the resulting debris (equivalent to approximately 30% of the total of the urban and special waste produced in the country). This is in spite of the fact that we have been experimenting with the use of inert waste for several years and are still a long way from its large-scale use. Recently, experiences of recovery aimed at using the debris from the building demolition, after being appropriately treated, have multiplied. For this reason, the material must undergo a somewhat complex treatment process in order to be reused and the various phases of the

reclassification require advanced and innovative technologies, possibly automatically controlled, to complete a series of operations for the selection, crushing, iron removal, lightweight material removal and homogenisation of the end product.

These recycled aggregates are a valid alternative to virgin materials, especially in view of the increasing need to propose suitable tools to protect the environment and the land. Recycling inert waste actually means:

- reducing the indiscriminate removal of non-renewable raw materials from the extraction activities, with the consequent preservation and improvement of the exploitation of deposits;
- finding alternative materials to the natural raw materials (gravel and sand);
- reducing the pressure on the environment caused by landfills;
- enabling a reduction in disposal costs.

As indicated previously, one of the main sources of C&D waste is, without doubt, the material produced from the many renovations and eventual demolition of buildings. Waste from civil works can include various materials, such as concrete, mortar, gypsum, bituminous foil, natural stone elements and brickwork, earth, wood, ceramics, glass, plastic, materials for thermoacoustic insulation, etc., which, for the most part, are inhomogeneous mixtures [2]. Construction and demolition waste can be substantially divided into three general categories:

- reusable fraction, consisting of those elements which can be brought back to their original form and function: windows, balcony railings, beams, etc.;
- recyclable fraction, consisting of recyclable waste or waste which can provide energy when incinerated;
- unusable fraction, consisting of unwanted components or fractions which contain pollutants, to be sent to landfill or treated separately.

Packaged concretes with recycled aggregates

Recycled aggregates consist of a mixture of different types crushed materials in variable quantities. It is appropriate to distinguish between recycled aggregates originating from the crushing of just concrete, and aggregates originating from debris but partially classified through preventive treatment. Aggregates from rubble are more heterogeneous due to the presence of impurities such as brick elements or tile fragments. Each of the types of recycled aggregates generally have a specific weight which is inferior to the natural weight (2500-2800 kg/m³) due to the presence of cement mortar (a porous material whose porosity depends on the a/c ratio of the original concrete) or that used in the construction of the masonry still bound to it.

As far as the absorption of water is concerned, it can be said that this property significantly differentiates natural aggregates from recycled ones and mainly depends on the presence and the quality of the cement mortar bonded to the original natural aggregate, resulting in an overall increase in moisture in recycled aggregates to the extent of 5% in the case of coarse, and 10% in fine. During the packaging of the cement, this condition can lead to an

alteration of the a/c ratio at the expense of mechanical strength.

The general tendency recorded sees that concrete containing recycled aggregates is less resistant in comparison to that with natural aggregates. For conglomerates with recycled aggregates from concrete alone, the tensile strength does not suffer a significant decline with the increase of the recycled percentage, a sign that a strong bond exists between the cement matrix and the reused aggregate. For packaged mixtures containing aggregates originating from rubble, on the other hand, a decrease in tensile resistance directly proportional to the percentage of recycled aggregates is observed, correlated to the presence of brick elements and impurities which show a bond with the weakest cement mixture.

In turn, the elastic module of the packaged concrete with recycled aggregates is generally inferior to traditional, with a reduction of between 10÷30%, up to 40% in the event that the recycled fine fraction completely derived from the crushing of demolished concrete is also used.

The loss of strength relating to the use of recycled aggregate in place of natural aggregate is increasingly limited, as the water/cement ratio of the two cement types gradually tends to increase. The reason for this may lie in the fact that a more porous cement matrix, in relation to a higher water/cement ratio, would tend to alleviate the negative effect caused by the presence of a weaker aggregate from a mechanical point of view, since the negative factor in this case would be represented by the cement matrix itself and, as we know, the value of the mechanical strength is determined by the component that tends to become stressed the earliest. In ordinary concretes prepared with natural aggregates, the cement matrix always represents the element of least resistance, as strong as it can be in virtue of a very low cement/water ratio. This data is inverted with concretes prepared with recycled aggregates. Indeed, by comparing the results of the resistance obtained by concretes containing recycled aggregates, with or without additives, which have been prepared using the same water/cement ratio, and therefore with a cement matrix of equivalent quality and a different dosage of fine aggregates, there is a loss of mechanical strength as a result of the greater volume of recycled aggregate at the expense of the volume of the cement matrix. This data defines the aggregate as the component with the least resistance. The introduction of superplasticiser additive to the mixture produces a decrease in the volume of the cement matrix and a resultant increase in the aggregate volume; for this reason, concretes with additives are always less resistant to related concretes with recycled aggregates without any type of addition, with the same water/cement ratio. This difference is much more evident the lower the water/cement ratio. It would be different if this additive were to be used as a water reducer, maintaining the same cement dosage and therefore decreasing the concrete's water/cement ratio. Please note, however, the opposite tendency with regards to the viscous flow of the concrete that is subjected to a constant load (creep): it is noted that the viscous flow for a partial or total

presence of recycled aggregates after one year is less in respect to that of ordinary concrete. Therefore, the combined action of the hydrometric withdrawal and the viscous flow would seem to lead to overall deformation values slightly higher to those of ordinary concrete.

Case study

In the sector of the seismic resistance of concretes with recycled aggregates, the most important experiments in our country are those conducted by Professor Giacomo Moriconi at the University Polytechnic of the Marche [3]. In the laboratory, in accordance with specific research protocols, a concrete has been packaged using recycled aggregates, in which 30% of the natural quarry aggregate was replaced with that from a demolition, produced in a concrete processing plant. The hysteresis curves indicate how there is less detachment between concrete and aggregate approaching the plastic field, with a consequently more limited crack mapping and a higher shear strength, in the mixture using recycled aggregates, depending on the maximum movement. The results of the experiments also indicate significant ductility values due to the higher deformability of concrete with recycled aggregates, allowing comparable ductility to ordinary concrete to be achieved, although with less tensile strength (figure 1, 2). The high performance levels of concrete with recycled aggregates under a dynamic load therefore indicate their reliability, certain to be optimised in the mix design, not just as a result of their static strength.

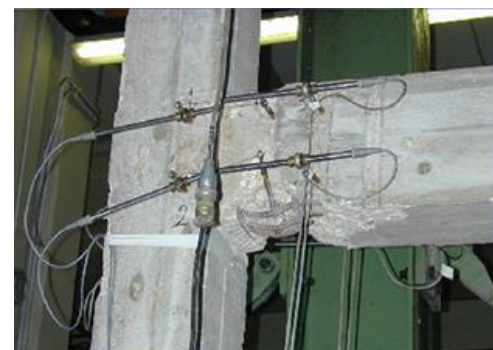


Fig. 1 - Damage of the concrete node in ordinary concrete. Photo by G. Moriconi.

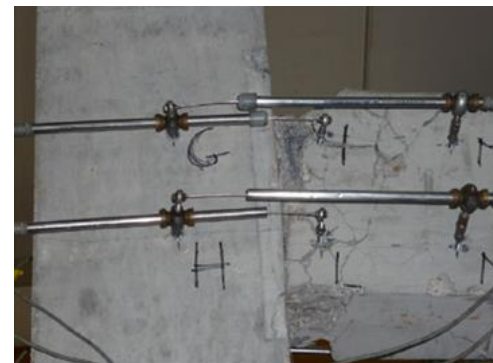


Fig. 2 - Damage of the concrete node with recycled aggregates. Photo by G. Moriconi.

The research developed in recent years has also seen some notable achievements. For example, the construction of a building intended for Life Studies courses at the University of Humboldt in Berlin in 2015. The concrete used for the

structure was a concrete mix design characterised by the use of recycled aggregates obtained from the crushing of recovered conglomerates. This outcome is currently perhaps the most significant moment in the passage from theory to practice, pointing to a way that the cement industry has now undertaken and which is to be considered one of the benchmarks for the technological future together with nanotechnology [4]. Additionally, another application is worth mentioning, even if the type and scale are markedly different from the previous example, conducted in Legnano by the DASTU department of the Polytechnic of Milan and by the company AMGA (an investee company concerned with the collection of USW) in 2014. In particular, a construction module intended as an information point and store was built in the Parco del Castello in the Lombardy city. The module, identified by the acronym STONE (SusTainable ONE), was designed and constructed almost exclusively from materials recovered by the students of Professor Rogora's Architectural Construction Laboratory at the Milanese polytechnic. Spatially, it occupies a 3.5 x 2.7 metre floorplan, with an internal height of 2.7 metres. The foundation was cast using tyres as disposable formwork for concrete castings, whereas the walls were constructed from wooden elements according to the construction technique used by Walter Segal for wooden constructions¹. Wooden elements recycled from the demolition of the stage design of a local cinema and theatre were used, and partially recovered and partially new elements. In particular, the shell for the walls was constructed in 4 types, reaching a thickness of 20 centimetres: from Tetra Pak, wheat straw glued with diluted vinyl resin, overlapping sheets of corrugated card and papercrete. The interior finishing with recycled wooden slats as well as the covering mantle constructed using PVC sheets, while the door and window were recovered from a building demolition [5].



Fig. 3 - STONE module in Legnano. Structure. Photo by A. Rogora



Fig. 4 - STONE module in Legnano. Photo by A. Rogora



Fig. 5 - STONE module in Legnano. Interior. Photo by A. Rogora



Fig. 6 - STONE module in Legnano. The walls with Tetra Pak cases. Photo by A. Rogora

Another case study is the STONE 2.0 construction module, measuring approximately 24 m², with a porch and intended to be used as a store and information point for activities at the Palazzo Stampa in Abbiategrasso. The module is a degree thesis with a supervisor, again Alessandro Rogora, and constructed in just five days by the students of the Architectural Construction Laboratory (Professors Rogora, Fianchini and Tagliabue). A solar collection system for passive air conditioning has been constructed in the South wall, as well as recovery fittings and a solar wall, built using recovered plastic bottles refilled with water and inserted into an insulating panel for the accumulation of solar energy. The exterior walls were constructed in wood with thermal insulation.

The last case to highlight is the recyclability of some buildings constructed in Brazil using the method proposed by Luiz Henrique M. Vefago, based on the classification and the hierarchy of materials depending on the fatigue life of specific products or buildings. In particular, three buildings in the South of Brazil constructed from ISO (International Organisation for Standardisation) containers were selected and used as a reference for a project conceived using traditional construction materials. The buildings using the containers were characterised by a high degree of recyclability, equivalent to 64%, contrary to the

traditional construction which has a low recyclability index in the design, evaluated at around 1.4% as well as a low index in the demolished part equivalent to 27.1%. Therefore, in relation to traditional construction, it demonstrated that the use of containers allows the recycling of a consistent part of a building at the end of its life cycle, and consequently an increase in the sustainability of the buildings themselves [5]. According to Barth and Vefago, selective demolition is an inverse process to the construction of a building, achievable through the planned disassembly of the construction elements of the building, allowing the physico-chemical properties of the materials to be maintained. In substance, it is a matter of proceeding over time, setting materials and "construction packages" aside, preventing their deterioration if they are concerned with the durability of the building interior. This principal facilitates activities and the recycling process, since its elements can be replaced with simple and cheap activities. Indeed, at the end of the building's life cycle, materials and products can be easily recovered and selectively separated according to their properties.

This method of the index of reversibility is based on the qualitative and qualitative measurement of the materials to calculate the building's overall index, applied beginning in the design phase up to the end of the building's life cycle. From the start, it anticipates a qualitative hierarchy to establish the potential recyclability of the construction material. The first grade consists of the complete reuse of the elements; the second, the possibility to recycle an individual material; the third grade consists of "infracycled materials", that is to say materials which can be used with the addition of previously unused material ("virgin" materials); while the last grade is that of original, non-renewable materials. After classification, it is necessary to estimate the percentage of materials for each grade in order to determine the recyclability index of the building during the design phase. The percentage of each category is subsequently multiplied by the value identified in the scale of an "inverted pyramid" diagram, and a final index of between 0 and 100 is obtained from the sum total of the various products (Table 1) [6]. If the final index value is 0, all of the original materials can still be detected in the building, if the index value is 100, all of the components and materials of the building have been recycled into other buildings. If the method is applied at the end of the life cycle, the index is called the Deconstruction Recyclability Index.

Tab. 1 - Multiplication values depending on the hierarchy of the recyclable materials according to Luiz Henriques Maccarini Vefago's method

BUILDING DESIGN	CLASSIFICATION	BUILDING DECONSTRUCTION
100	REUSED	100
75	RECYCLED + RENEWABLE	75
50	INFRACYCLED	50
25	INFRAUSED	25
0	NON-RENEWABLE VIRGIN	*****
*****	LANDFILL	0

Conclusions

From the proposed analysis, it is obtained as the properly treated and screened material from recycling plants, in accordance with specific particle size curves and with the moisture calculated according to the Bolomey equation², it can be used in relation to the particle size classes obtained from previous processing. In this sense, with a maximum diameter greater than 15 millimetres, the possibility for its reuse in the construction of road surfaces, railway and runways and for industrial plants is practicable. Alternatively, the 5-15 millimetre class, combined with the 0-5 millimetre class, can be used for structural cement conglomerates for construction in hi-tech mortars and concretes, such as Self Compacting Concrete (SCC). Lastly, the response to durability performance is subtle. In addition to studies concerning structural resistance, many are being carried out on the heat transfer performance of the shell, making this issue a fundamental element for sustainable construction. Beyond the study cases reported in the script, important progress is also being made with other solutions compatible with thermal flows aimed at energy saving and physiological wellbeing. For example, shells can be constructed with materials that are vegetable, mineral and newspaper pulp in origin.

For other purposes, the use of photovoltaic panels coupled with end of the useful life and sludges obtained from the processing of washing silt for the composition of concretes intended to environmentally restore the quarries. Similarly, the obtaining of mortar with aggregate extracted from shattered glass seems a viable option and in a phase of advanced experimentation. It is necessary to specify how this state of advancement of research requires regulatory support that began with a RILEM document in 1981, but published in 1993, has been little recognised both in state and regional laws. This is accompanied by the need to think about special tender and quality criteria.

REFERENCES

- [1] Catalano A., Sansone C., [2009], Possibilities for the use of recycled materials in concrete production processes", INCONCRETO, 89, Edizioni ImReady
- [2] Catalano A., [2019], "Concrete with recycled aggregates", INCONCRETO, 166, Edizioni ImReady
- [3] Moriconi G., [2015], "Technical aspects relating to the use of recycled aggregates in structural concrete", in the documents of The Journal of Recycling Studies as a virtuous practice in a sustainable project, pg. 182-195
- [4] Catalano A., [2016], "Ecomateriali", in Modulo n. 401, BE-MA Editrice, pg. 70-71
- [5] Rogora A., [2015], "Constructing extraordinary buildings using recovered materials. Experiences between research, study and profession", in the documents of The Journal of Recycling Studies as a virtuous practice in a sustainable project, University of Rome Tre, pg. 226-241
- [6] Barth F., Vefago L.H.M., Carbonari L.T., [2017], The recyclability index and its application in buildings made with reused ISO containers, in the documents of the study journal "Waste as a resource in a sustainable project, University of Rome Tre, pg. 51-64

NOTES

1. Walter Segal, the British nationalised Swiss architect, has designed a self-construction system for wooden buildings.
2. The Bolomey equation:
$$Ab = 0,09 \sqrt[3]{d_1 d_2}$$
is particularly applicable for diameters superior to 1 millimetre where d_1 and d_2 are the dimensions in millimetres in which the aggregate class is included.

L'USO DEI MATERIALI DA RICICLAGGIO PER SISTEMI COSTRUTTIVI SOSTENIBILI

Abstract

Alla fine degli anni '80 l'ecologia è entrata nella sensibilità dell'opinione pubblica ai fini della qualità della vita e della salute delle persone. In un sondaggio dell'allora comunità europea (ristretta a soli 12 paesi) del 1982 l'Italia prese coscienza del degrado del paesaggio, dell'inquinamento sia ambientale che acustico, lo smaltimento dei rifiuti. Proprio la gestione dei rifiuti ha indotto lo studio scientifico del riciclaggio degli scarti da smaltire per la produzione di materiali per l'edilizia e delle procedure per C&D anche tramite l'elaborazione della demolizione selettiva degli edifici. Componenti per i calcestruzzi come le sfere di schiuma di vetro, derivanti dal trattamento ad espansione dei rottami di vetro, il polistirene ad alto impatto HIPS, microsfele da plastica indifferenziata per gli asfalti, blocchi leggeri di partizione dal compattamento di sacchetti di plastica, trattamento della carta e degli involucri in tetrapack, come il newspaperwood e altri pannelli prodotti da fibre di cellulosa con livelli di performance specializzati. Le deduzioni di questa trattazione sono mirate a valutare criticamente la applicabilità delle sperimentazioni in atto.

Parole chiave: ecologia, calcestruzzi, rifiuti, riciclaggio, demolizione selettiva

Introduzione

Nell'ultimo decennio del ventesimo secolo la società italiana, e non solo, ebbe coscienza che occorre un ripensamento radicale sul rapporto tra ecologia e fattori economici. I termini di tale relazione furono decisamente diversi dai precedenti quando i costi per la difesa dell'ambiente erano visti come un onere inevitabile sebbene disincantato alla crescita economica e sociale del paese. Si giunse alla considerazione che l'ambiente fosse una risorsa con un valore economico decisamente elevato e da accrescere identificando l'inquinamento come una diseconomia esterna. Scientificamente gli economisti discutevano su come valutare in tal senso l'utilità del benessere ambientale che le acquisite stime quantitative del prodotto pro-capite del tempo non erano capaci di fornire. Ciò significava considerare il deterioramento ecologico in termini di costi per la perdita delle risorse naturali e dei conseguenti investimenti per la loro ricostituzione che la collettività deve sostenere per ottenere la qualità dei servizi che essa ricava dal patrimonio di acqua, aria, territorio, che qualifica il bene ambiente stesso. Nel ventesimo secolo il dibattito ha condotto alla sempre più forte pratica del riutilizzo dei rifiuti solidi che ha visto, tra l'altro, una ricaduta sull'edilizia per il confezionamento di conglomerati cementizi caratterizzati da mix design con uso di inerte riciclato.

L'ingegneria dell'ambiente

È in questo panorama sociale che si sono sviluppate pragmaticamente una politica ed una tecnica di ingegneria ambientale basate su cultura e consapevolezza interrelate con l'economia e la sociologia in un unico insieme quantistico caratterizzato dal governo dei sistemi ambientali come pianificazione nella fase progettuale e controllo nella fase operativa. Su tale considerazione si può riportare il caso di Göteborg, città svedese di 500.000 abitanti, con forti problematiche per l'approvvigionamento di fonti di riscaldamento. Questa cittadina è riuscita a risolvere tale questione non tramite il potenziamento delle

centrali di riscaldamento, cosa che avrebbe visto un incremento fortissimo delle spese petrolifere, nè con l'orientamento degli edifici secondo l'asse solare, nè tramite pannelli fotovoltaici, ma tramite il riciclaggio di fonti non convenzionali. In pratica, per circa 150.000 abitazioni si è adottato il teleriscaldamento per l'85% del fabbisogno totale e solo il rimanente 15% con la combustione di gas naturale e olio. In particolare, si utilizza il 33% dal calore di scarto di due raffinerie situate in prossimità della città, il 26% del calore ricavato dall'impianto di incenerimento dei rifiuti urbani, il 6% da impianti di cogenerazione alimentati da combustibili fossili e il 4% da un impianto di cogenerazione alimentato da biogas ricavati dalla digestione del sedimento solido depositato sul fondo delle vasche di trattamento delle acque fognarie. Infine, si riciclano dopo la depurazione le acque reflue dell'impianto fognario da docce, lavatrici e lavandini. Tutta tale procedura, insieme ad una valida progettazione degli involucri ai fini della contenuta dispersione del calore, consente di risparmiare in un anno 9.000 MWh di energia elettrica. Questo della città di Göteborg non è l'unico esempio di un certo rilievo di come si possa utilizzare la pratica progettuale sostenibile tramite il riutilizzo di materiali destinati allo smaltimento. Il concetto stesso di sostenibilità contiene parametri per il riuso paragonabili a quelli dell'altro grande filone quale l'uso di fonti energetiche naturali. Anzi, le due strade si intersecano fortemente dando origine ad una tecnologia che nasce componendo fattori caratteristici dell'una e dell'altra per realizzarne una innovativa ma in se stessa già esistente secondo il concetto di rigenerazione tecnologica poetica.

Il riciclaggio dei rifiuti per la produzione di materiali per l'edilizia

L'attività di riciclaggio sta assumendo un ruolo sempre più importante estendendosi ad un numero crescente di ambiti produttivi, tra i quali quello delle costruzioni. In particolare appare sempre più preoccupante il problema della collocazione delle macerie derivanti dalla demolizione di opere civili, in continuo aumento a seguito di interventi di recupero del patrimonio edilizio esistente e dell'adeguamento a nuove esigenze abitative. A ciò si contrappone il progressivo esaurimento delle aree disponibili per l'ubicazione di discariche che rende lo smaltimento di tali materiali di scarto sempre più difficoltoso ed oneroso. Risulta quindi evidente come il riciclaggio dei materiali da demolizione possa non solo costituire una soluzione al problema legato ad ingenti volumi di rifiuti da smaltire in discarica, ma anche una via alternativa al consumo di risorse naturali non rinnovabili [1]. La Comunità Europea ha emanato dati statistici sulla produzione annua di rifiuti da demolizione e costruzione (C&DW, Construction and Demolition Waste) ed il relativo riutilizzo in ciascun paese membro. Nonostante i dubbi sull'affidabilità ed il realismo dei dati, ufficiali e quindi non comprendenti l'enorme quantità di materiale smaltito illegalmente, appare chiaro un diverso comportamento fra paesi nord-europei, più propensi al riciclo delle macerie, probabilmente anche per scarsità di risorse naturali, e paesi sud-europei, con percentuali di riutilizzo decisamente basse ed orientate a specifiche applicazioni, forse anche per la possibilità di un incontrollato sfruttamento intensivo di risorse naturali. È possibile, tuttavia, individuare un significativo andamento della situazione nei singoli paesi membri ed in Europa che mette in evidenza comportamenti significativamente differenziati nell'ultimo decennio fra paesi nord-europei che hanno già raggiunto l'obiettivo fissato dalla direttiva europea (70%), paesi prevalentemente mitteleuropei che si stanno più o meno avvicinando a tale obiettivo (40-70%). In particolare, è stato stimato che solamente il 10% circa della grande quantità di rifiuti inerti prodotti annualmente in Italia è materiale da riciclo, percentuale piuttosto bassa se si pensa che la produzione annua di tali scarti si aggira intorno a 40 milioni di tonnellate di detriti di risulta (pari al 30% circa del totale dei rifiuti urbani e speciali prodotti sul territorio nazionale). Nonostante da alcuni anni si stia sperimentando l'impiego di rifiuti inerti si è ancora

molto lontani da un loro utilizzo su larga scala. Di recente, si sono moltiplicate le esperienze di processo di recupero al fine di impiegare, in alternativa ai materiali tradizionali di cava, i detriti di risulta delle demolizioni dei manufatti edili, dopo un adeguato trattamento. A tal fine, il materiale deve essere sottoposto ad un processo di trattamento piuttosto complesso per essere convenientemente impiegato al reimpiego e le diverse fasi di riqualificazione richiedono tecnologie evolute ed innovative, controllate possibilmente in modo automatico, per completare una serie di operazioni di selezione, di frantumazione, di deferrizzazione, di asportazione di materiali leggeri e di omogeneizzazione del prodotto finale.

Questi aggregati riciclati costituiscono una valida alternativa ai materiali vergini, in vista soprattutto della necessità sempre maggiore di proporre strumenti idonei per la salvaguardia dell'ambiente e del territorio. Riciclare i rifiuti inerti significa infatti:

- ridurre il prelievo indiscriminato di materie prime non rinnovabili da attività estrattive, con conseguente preservazione e miglioramento dello sfruttamento dei giacimenti;
- reperire materiali sostitutivi delle materie prime naturali (ghiaia e sabbia);
- ridurre la pressione ambientale delle discariche; consentire un abbassamento dei costi di smaltimento.

Come prima indicato, una delle principali fonti dei rifiuti da C&D è senza dubbio costituita dal materiale prodotto dalle tante ristrutturazioni e dalle eventuali demolizioni dei fabbricati. I rifiuti di scarto derivanti dalle opere civili possono comprendere materiali vari quali: calcestruzzo, malte, gesso, guaine bituminose, elementi lapidei naturali e laterizi, terre, legno, metalli, ceramiche, vetro, plastica, materiali per l'isolamento termo-acustico, etc., che nella maggior parte dei casi si presentano sotto forma di miscugli molto disomogenei [2].

Sostanzialmente i rifiuti da costruzione e demolizione possono essere suddivisi in tre categorie generali:

- frazione riutilizzabile, costituita da quegli elementi che possono essere riportati alla loro forma e funzione originali: finestre, inferriate di balconi, travi, etc;
- frazione riciclabile, costituita da scarti riciclabili o da rifiuti che, sottoposti a termodistruzione, forniscono energia;
- frazione inutilizzabile, costituita dai componenti indesiderati o dalle frazioni che contengono inquinanti, da conferire in discarica o trattare separatamente.

Calcestruzzi confezionati con aggregati da riciclo

Gli aggregati da riciclo sono costituiti da una miscela di grani di natura diversa presenti in quantità variabili. È opportuno distinguere tra aggregati riciclati provenienti dalla frantumazione di soli calcestruzzi e aggregati provenienti da macerie ma parzialmente qualificati tramite trattamento preventivo. Gli inerti provenienti da macerie sono più eterogenei per la presenza anche di impurità come elementi in laterizio o frammenti di piastrelle. Generalmente entrambi i tipi di aggregati riciclati hanno un peso specifico inferiore ai naturali (2500-2800 kg/m³) per la presenza della malta cementizia (materiale poroso la cui porosità dipende dal rapporto a/c del calcestruzzo originario) o da quella utilizzata per la realizzazione delle murature che vi rimane legata.

Per quel che riguarda l'assorbimento d'acqua si può affermare come tale proprietà differenzia notevolmente gli aggregati naturali da quelli di riciclo e dipende principalmente dalla presenza e dalla qualità della malta cementizia legata all'aggregato originale naturale determinando un aumento d'acqua complessivo degli aggregati di riciclo dell'ordine del 5% nel caso dei grossi e del 10% per quelli fini. Tale condizione in fase di confezionamento del calcestruzzo può provocare l'alterazione del rapporto a/c a scapito della resistenza meccanica.

La tendenza generale che si registra vede il calcestruzzo con aggregati riciclati meno resistente rispetto a quello con aggregati naturali. Per i conglomerati realizzati con inerti riciclati da solo calcestruzzo la resistenza a trazione non subisce significativi cali con l'aumento della percentuale di riciclato segno che esiste un buon legame tra la

matrice cementizia e l'aggregato riutilizzato. Per gli impasti confezionati con inerti provenienti da macerie si riscontra, invece, una diminuzione della resistenza a trazione direttamente proporzionale all'aumento della percentuale di aggregati riciclati, correlata alla presenza di elementi di laterizio e impurità che presentano un legame con la pasta cementizia più debole.

A sua volta, il modulo elastico del calcestruzzo confezionato con aggregati di riciclo risulta generalmente inferiore di quello tradizionale, subendo riduzioni comprese tra il 10-30% fino a raggiungere il 40% nel caso venga utilizzata anche la frazione fine di riciclo sempre derivante dalla frantumazione di cls demolito.

La perdita di resistenza relativa all'impiego di aggregato riciclato al posto dell'inerte naturale è sempre più contenuta, man mano che il rapporto/acqua cemento dei due tipi di calcestruzzo tende a crescere. La ragione potrebbe risiedere nel fatto che una matrice cementizia più porosa, relativa ad un maggiore rapporto acqua/cemento, tenderebbe ad attenuare l'effetto negativo causato dalla presenza di un aggregato più debole da un punto di vista meccanico, poiché probabilmente in questo caso il fattore negativo sarebbe rappresentato dalla matrice cementizia stessa e, com'è noto, il valore della resistenza meccanica viene determinato da quel componente che per primo tende ad andare in crisi. Nei calcestruzzi ordinari preparati con inerti naturali la matrice cementizia rappresenta sempre l'elemento a minore resistenza, per quanto robusta essa possa essere in virtù di un rapporto acqua/cemento molto basso. Questo dato risulta invertito nel caso di calcestruzzi preparati con aggregato riciclato. Infatti, confrontando i risultati di resistenza ottenuti per i calcestruzzi con inerte riciclato, con o senza additivo, che sono stati preparati con lo stesso rapporto acqua/cemento, e quindi con una matrice cementizia di pari qualità, ed un diverso dosaggio di aggregato fine, si nota come vi sia stata una perdita di resistenza meccanica dovuta alla presenza di un maggior volume di aggregato di riciclo a scapito del volume di matrice cementizia. Questo dato definisce come componente di minor resistenza proprio l'inerte. L'introduzione di additivo superfluidificante nell'impasto produce una diminuzione del volume della matrice cementizia ed un conseguente aumento del volume di aggregato; per questo motivo, a parità di rapporto acqua/cemento i calcestruzzi con additivo sono risultati sempre meno resistenti dei relativi calcestruzzi con inerti riciclati senza alcun tipo di aggiunta. Tale differenza è tanto più evidente quanto minore è il rapporto acqua/cemento. Diversa cosa sarebbe se tale additivo fosse utilizzato come riduttore d'acqua mantenendo lo stesso dosaggio di cemento e quindi diminuendo il rapporto acqua/cemento del calcestruzzo. Si segnala invece una tendenza opposta per quanto riguarda lo scorrimento viscoso del calcestruzzo sottoposto a un carico costante (creep): si è notato che per la parziale o totale presenza di aggregati riciclati lo scorrimento viscoso dopo un anno è ridotto rispetto a quello del calcestruzzo ordinario. Pertanto, l'azione congiunta del ritiro idrometrico e dello scorrimento viscoso sembrerebbe portare a valori complessivi di deformazione di poco superiori a quelli del calcestruzzo ordinario.

Casi studio

Nel settore della resistenza sismica dei calcestruzzi con inerti da riciclaggio la sperimentazione più importante nel nostro paese è quella condotta dal Prof. Giacomo Moriconi dell'Università Politecnica delle Marche [3]. In laboratorio, secondo un protocollo di ricerca specifico, è stato confezionato un calcestruzzo con aggregati riciclati nel quale l'inerte naturale di cava è stato sostituito al 30% con quello prodotto in un impianto di trattamento del calcestruzzo proveniente da demolizioni. Le curve di isteresi indicano come avvicinandosi al campo plastico si riscontri un minor distacco tra calcestruzzo e inerte con un conseguente quadro fessurativo più contenuto ed una resistenza a taglio del composto con aggregati riciclati più elevata in funzione dello spostamento massimo. I risultati della

sperimentazione, inoltre, indicano apprezzabili valori di duttilità per la maggiore deformabilità del calcestruzzo con aggregati riciclati consentendo di ottenere paragonabili livelli di duttilità con il calcestruzzo ordinario sebbene la resistenza a trazione minore (figura 1, 2). I buoni livelli prestazionali del calcestruzzo con aggregati riciclati sotto carico dinamico indicano pertanto la sua affidabilità, certo da perfezionare nei mix design, non solo per la resistenza statica.

La ricerca sviluppata in questi anni ha visto anche realizzazioni di un certo rilievo. Ad esempio, nel 2015 a Berlino è stato costruito un edificio destinato ai laboratori per il corso di studi in Scienze della vita della Humboldt University. Il calcestruzzo adoperato per la struttura ha visto il mix design caratterizzato dall'uso di aggregati riciclati ricavati dalla frantumazione di conglomerati recuperati. Tale risultato è, forse, attualmente il più significativo momento di passaggio dalla teoria alla pratica indicando una strada che l'industria del cemento ha ormai intrapreso e che è da considerare uno dei caposaldi per il futuro tecnologico unitamente alle nanotecnologie [4].

È da segnalare, inoltre un altro momento applicativo, seppur di dimensioni e natura decisamente diverse dal precedente condotto nel 2014 nel comune di Legnano dal Dipartimento DASTU e del Politecnico di Milano e dalla società AMGA (Società partecipata che si occupa della raccolta di RSU). In particolare, si è realizzato nel Parco del Castello della cittadina lombarda modulo edilizio destinato a punto informativo e deposito. Il modulo, identificato con l'acronimo STONE (SusTainable ONE), è stato progettato e costruito quasi esclusivamente con materiali di recupero dagli allievi del Laboratorio di Costruzione dell'Architettura del Prof. Alessandro Rogora dello stesso Politecnico milanese. Spazialmente è caratterizzato da una pianta di 3,50 x 2,70 metri ed un'altezza interna di 2,70 metri. La fondazione è stata gettata mediante pneumatici come casseforme a perdere per i getti di calcestruzzo, mentre le pareti sono state realizzate con elementi in legno secondo la tecnica costruttiva utilizzata da Walter Segal per le costruzioni in legno¹. Per la struttura sono stati impiegati elementi in legno riciclati dalla demolizione dell'impianto scenico di un cinema e teatro del luogo, ed elementi in parte di recupero e in parte nuovi. Particolare l'involucro le cui pareti sono state realizzate in 4 tipologie per uno spessore di 20 centimetri: in tetrapak, paglia di grano incollata con resina vinilica diluita, fogli di cartone ondulato sovrapposti e cartacemento (papercrete). Le finiture interne sono con listelli in legno di riciclo così come il manto di copertura realizzato con teli in PVC mentre porta e finestra sono stati recuperati dalla demolizione di un edificio [5].

Altro caso studio è il modulo edilizio STONE 2.0 di circa 24 mq in pianta con un portico e destinato a deposito e punto informativo per le attività di Palazzo Stampa ad Abbiategrasso. Il modulo è una tesi di laurea con relatore ancora Alessandro Rogora e realizzato in soli cinque giorni dagli studenti del Laboratorio di Costruzione dell'Architettura (proff. Rogora, Fianchini, Tagliabue). Nella parete sud è stato realizzato un sistema di captazione solare per la climatizzazione passiva oltre infissi di recupero e un muro solare realizzato con bottiglie in plastica di recupero riempite di acqua, inserite in un pannello isolante, per l'accumulo di energia solare. Le pareti esterne sono state realizzate in legno con coibente per l'isolamento termico.

Ulteriore caso da indicare è stato la riciclabilità di edifici realizzati in Brasile utilizzando il metodo proposto da Luiz Henrique M. Vefago basato sulla classificazione e gerarchizzazione di materiali in funzione dell'esaurimento del ciclo di vita di prodotti specifici o di edifici. In particolare, sono stati selezionati tre edifici nel sud del Brasile realizzati con container ISO (International Standard Organization) ed è stato utilizzato come riferimento un progetto ideato con materiali edili tradizionali. Gli edifici con container sono caratterizzati da un grado di riciclabilità elevato pari al 64%, contrariamente all'edificio tradizionale che ha un basso indice di

riciclabilità nella progettazione valutato nel 1,4% oltre che un basso indice nella parte demolita pari al 27,1%. Si è dimostrato, quindi, che l'utilizzo del container consente rispetto alle costruzioni tradizionali di riciclare una parte consistente di un edificio a conclusione del suo ciclo di vita e conseguentemente all'aumento della sostenibilità degli edifici stessi [6]. Secondo Barth e Vefago, la demolizione selettiva è un processo inverso alla costruzione dell'edificio, ottenibile tramite lo smontaggio programmato degli elementi costruttivi di parti dell'edificio per consentire la conservazione delle proprietà fisico-chimiche dei materiali. In sostanza, si tratta di procedere nel tempo accantonando materiali e "pacchetti costruttivi" impedendo il loro deterioramento se coinvolti nella durabilità dell'intero edificio. Questo principio facilita le operazioni e il processo di riciclaggio, poiché i suoi elementi possono essere sostituiti con operazioni semplici ed economiche. Infatti, alla fine del ciclo di vita dell'edificio, materiali e prodotti possono essere facilmente recuperati e separati selettivamente secondo le loro proprietà.

Tale metodo dell'indice di reversibilità si basa sulla misurazione qualitativa e quantitativa dei materiali per il calcolo dell'indice globale dell'edificio applicato a partire dalla fase progettuale fino alla fine del ciclo di vita dell'edificio. Esso prevede in partenza una gerarchia qualitativa per stabilire il potenziale di riciclabilità del materiale edile. Il primo grado è costituito dal riuso totale dell'elemento, il secondo dalla possibilità di riciclaggio del singolo materiale, il terzo è costituito dai materiali infraciclo, cioè materiali che prevedono l'utilizzo aggiungendo materiale mai utilizzati precedentemente (materiali "vergini"), mentre l'ultimo grado è quello del materiale originale

non rinnovabile. Dopo la classificazione occorre stimare le percentuali di materiale per ciascun grado al fine di determinare l'Indice di Riciclabilità dell'Edificio in fase di progettazione. La percentuale di ogni categoria è successivamente moltiplicata per il valore individuato nella scala di un diagramma a "piramide invertita" e sommando i vari prodotti tra loro si ottiene l'indice finale che è compreso tra 0 e 100 (Tabella 1) [6]. Se il valore finale dell'indice è 0 tutti i materiali originari sono ancora rilevabili nell'edificio, se il valore finale dell'indice è 100 tutti i componenti ed i materiali dell'edificio sono stati riciclati in altri edifici. Se il metodo è applicato alla fine del ciclo di vita l'indice viene definito Indice di Riciclabilità di Decostruzione.

Conclusioni

Dall'analisi proposta si ricava come il materiale proveniente da impianti di riciclaggio opportunamente trattato e vagliato secondo specifiche curve granulometriche e con il calcolo dell'acqua di bagnatura secondo la formula del Bolomey2 può essere utilizzato in relazione alle classi granulometriche ricavate dalla lavorazione preventiva. In tal senso, con diametro massimo maggiore di 15 millimetri è praticabile la possibilità di riutilizzo per la realizzazione di pavimentazioni stradali, ferroviarie, aeroportuali e per stabilimenti industriali. In alternativa, la classe 5-15 millimetri, combinata con la 0-5 millimetri, può essere adoperata per conglomerati cementizi strutturali per l'edilizia per malte e calcestruzzi a alta tecnologia come i Self Compacting Concrete (SSC). Infine, discreta la risposta alla prestazione di durabilità.

Oltre agli studi sulla resistenza strutturale molto si sta facendo anche per le prestazioni di trasmissione del calore dell'involucro costituendo tale problematica un elemento fondamentale per l'edilizia sostenibile. Oltre i casi di studio riportati nello scritto si stanno facendo progressi importanti anche con altre soluzioni compatibili con i flussi termici ai fini del risparmio energetico e del benessere fisiologico. Ad esempio si possono realizzare involucri con materiali di origine vegetale, animale e cellulosa prodotta da carta di giornale.

Per altri scopi, si testa l'utilizzo di pannelli fotovoltaici giunti al termine della vita utile e fanghi ottenuti dalla lavorazione di limi di lavaggio per la composizione di calcestruzzi destinati al ripristino ambientale delle cave. Allo stesso modo l'ottenimento di malte con aggregato ricavato da vetro frantumato sembra una strada percorribile e in fase di sperimentazione avanzata.

Occorre precisare come tale stato di avanzamento della ricerca richieda un sostegno normativo che iniziato nel 1981 con un documento RILEM, ma pubblicato nel 1993, ha visto uno scarso riconoscimento sia nelle leggi dello stato che delle regioni. A ciò si accompagna la necessità di pensare a criteri speciali di appalto e di qualità.

NOTE

1. Walter Segal, architetto svizzero naturalizzato britannico, ha progettato un sistema di autocostruzione per edifici in legno.
2. La formula del Bolomey:
$$Ab = 0,09 \sqrt[3]{d_1 d_2}$$
è particolarmente applicabile per diametri superiori ad 1 millimetro dove d_1 e d_2 sono le dimensioni in millimetri in cui è compresa la classe di inerte.