

Antonello Monsù Scolaro^a, Lia Marchi^b,

^a Dipartimento di Architettura, Design ed Urbanistica, Università di Sassari, Italia

^b Dipartimento di Architettura, Alma Mater Studiorum, Università di Bologna, Italia

amscolaro@uniss.it

lia.marchi3@unibo.it

Abstract. La riqualificazione è largamente riconosciuta come strategia per ridurre gli impatti ambientali del patrimonio costruito, ma non è ambientalmente neutra. Per mantenere in opera la maggior quantità di materiali, in funzione delle prestazioni tecnologiche residue, quindi contenere il consumo di nuove risorse e la produzione di rifiuti da demolizione, è necessaria un'approfondita conoscenza del manufatto. In ampliamento agli strumenti esistenti, è presentata una metodica di analisi degli impatti ambientali e supporto progettuale alla scala del dettaglio esecutivo. Utilizzando gli indicatori di energia incorporata e di CO₂ equ, le alternative di intervento sono valutate in ottica *life cycle* allo scopo di riutilizzare quanta più materia possibile e preferire materiali a basso impatto ambientale.

Parole chiave: Patrimonio Costruito; Riutilizzo; Riqualificazione; Bilancio ambientale; Impatti incorporate.

Opportunità ambientali nel progetto di riqualificazione

Il settore delle costruzioni è responsabile di una quota consistente di impatti ambientali ma, in accordo con le politiche eu-

ropee atte a contrastarne le crescenti criticità (COM 445; COM 398; COM 614), le tecnologie oggi disponibili permettono di mantenere in opera e riqualificare il costruito anche in un'ottica di economia circolare (Pomponi e Moncaster, 2017).

Il progetto di riqualificazione, presupponendo il riutilizzo di materiali e componenti (Addis, 2006), contribuisce sia al prolungamento del ciclo di vita della materia valorizzando l'energia incorporata, che alla riduzione dell'uso di risorse primarie e della produzione di rifiuti da costruzione e demolizione¹ rendendo il patrimonio costruito un ingente giacimento di risorse materiali (Cossu, 2013).

Tuttavia, la riqualificazione dell'esistente, non sempre produce bilanci ambientali positivi (Munarim e Ghisi, 2016; Berg e Fuglseth, 2018); la potenziale perdita delle quote di materia ed ener-

gia incorporate negli elementi costruttivi dismessi e il mancato controllo della qualità ambientale di nuovi materiali e componenti introdotti, rischia di produrre impatti maggiori di quelli che si otterrebbero dalla demolizione e nuova costruzione. Così, mantenere in opera quanti più materiali possibili, limitare le integrazioni e le sostituzioni, avviare a riciclo la materia dismessa, scegliere i materiali in funzione del profilo ambientale, sono criteri operativi ormai riconosciuti per ridurre gli impatti associati (Advisory Council, 1979; Preservation Green Lab, 2011; CEN 2017). A tale scopo, ottimizzare le prestazioni residue degli elementi tecnici preesistenti risulta una strategia utile fin dalle prime fasi del processo progettuale, da affinare progressivamente fino alla scala esecutiva per orientare il progetto verso scelte a basso impatto ambientale.

Aspetti ambientali tra demolizione, riqualificazione e nuova costruzione

Nei Paesi UE circa la metà del patrimonio esistente è anteriore al 1970, precedente cioè all'introduzione dei regolamenti sull'efficienza energetica e la sicurezza sismica (European Commission, 2014). In Italia, oltre il 60% del parco edilizio residenziale ha più di 45 anni (ENEA, 2016).

Dunque, si tratta di edifici la cui obsolescenza tecnica e funzionale è oggi accelerata da richieste crescenti di efficienza energetica, comfort indoor e sicurezza strutturale; inoltre gli impatti ambientali associati all'*operational energy* – che in termini di *Global Warming Potential*, *Abiotic Depletion Potential* e *Toxicity Potential* misurano rispettivamente l'80%, il 95% e l'85% rispetto

The environmental balance as decision support to the refurbishment detailed design

Abstract. The refurbishment design is a well-known strategy to mitigate environmental impacts of the built heritage, but it is not environmentally neutral. A deep knowledge of the building is required in order to maintain the greatest amount of materials – depending on its residual technological performances – and thus containing the consumption of new resources and the production of demolition wastes. Following up existing tools, a method to analyse environmental impacts and support the design at the executive level is presented. Possible intervention alternatives are evaluated from a life cycle perspective, through the embodied energy and CO₂ equ indicators, aiming at re-using as much material as possible and preferring new materials with low environmental impact.

Keywords: Existing buildings; Reuse; Refurbishment; Environmental assessment; Embodied impacts.

Environmental opportunities in refurbishment

The building sector is responsible for a great amount of environmental impacts but, in line with European policies that cope with its growing criticalities (COM 445; COM 398; COM 614), the nowadays available technologies allow to preserve and regenerate the built heritage, even from a circular economy perspective (Pomponi and Moncaster, 2017).

Assuming the re-use of materials and building components (Addis, 2006), the refurbishment design extends the life cycle of materials by taking advantage of their embodied energy and moreover reduces the use of primary resources and the production of construction and demolition wastes¹. This makes the built heritage a huge reservoir of resources (Cossu, 2013).

However, refurbishment interventions

do not always produce positive environmental balances (Munarim and Ghisi, 2016; Berg and Fuglseth, 2018). In fact, the potential loss of matter and embodied energy in the dismantled elements and the lack of control of the environmental quality of added materials and components risk to produce greater impact than demolition and new construction.

Thus, to maintain as much material as possible, to limit integrations and replacements, to recycle the dismantled building components, to choose materials according to their environmental profile, are now recognized operational criteria to reduce the associated impacts (Advisory Council, 1979; Preservation Green Lab, 2011; CEN 2017). To this purpose, optimizing the residual performance of the existing building materials could be a good strategy to be adopted from early

alla *primary energy* (Ecorys, 2014) – ne motiverebbero la demolizione e sostituzione con edifici meno energivori e inquinanti. Tuttavia secondo Mickaityte *et al.* (2008), un intervento di riqualificazione condotto secondo principi di sostenibilità ambientale garantisce il 23% di risparmio di energia in fase di cantiere rispetto alla nuova costruzione; mentre secondo Moe *et al.* (2007), pur riciclando il 40% dei materiali demoliti da un edificio storico, occorrerebbero almeno 65 anni a un edificio energeticamente efficiente di nuova costruzione per recuperare le energie e le risorse perdute con la demolizione. Inoltre, in alcuni casi è possibile valorizzare economicamente la materia prima-seconda originata dalle attività di demolizione (Paleari e Campioli, 2015), portando la quota parte riciclata a bilancio ambientale positivo rispetto all'intero ciclo di vita dell'edificio (Blengini, 2009). Itard e Klunder (2007) comparano gli impatti associati a differenti gradi di riqualificazione in due casi di rigenerazione urbana in Olanda, considerando come *starting point* il ciclo di vita utile dell'edificio riqualificato. Utilizzando come indicatori le quantità di materiali, energia e acqua impiegati, di rifiuti prodotti, dimostrano che adottando soluzioni costruttive a minor energia incorporata, il tempo di recupero degli impatti prodotti si riduce. Rasmussen e Birgisdóttir (2016), applicano una procedura LCA semplificata basata sulla EN 15978 per verificare i tempi di ritorno degli impatti ambientali nella riqualificazione di un edificio di abitazione in Danimarca, su un arco temporale di 50 anni di vita utile post intervento. Considerando soltanto l'energia impegnata nella fase *from cradle to gate* dei materiali impiegati e per la dismissione dei rifiuti da demolizione e il consumo annuale di energia operativa dopo la riqualificazione, tutti gli impatti associati all'intervento di riqualificazione dopo

design stages; to be then progressively refined up to the working drawing, to steer the design towards low environmental impact choices.

Environmental issues among demolition, refurbishment and new construction

In EU countries about half of the building stock is prior 1970, that is before the introduction of regulations on energy efficiency and seismic safety (European Commission, 2014). In Italy, more than 60% of the residential stock is over 45 years old (ENEA, 2016). Now the technical and functional obsolescence of these buildings is accelerated by increasingly stricter requirements on energy efficiency, indoor comfort and seismic safety. In addition, the environmental impact associated to the operational energy – which in terms of *Global Warming Po-*

tential, Abiotic Depletion Potential and Toxicity Potential respectively count for the 80%, 95% and 85% in comparison with primary energy (Ecorys, 2014) – would support the replacement of old buildings with new constructions less energy-intensive and polluting. However, according to Mickaityte *et al.* (2008), a refurbishment that meets environmental sustainability principles can save up to 23% energy during the building site phase in comparison with a new building. While Moe *et al.* (2007) note that even if the 40% of the dismantled materials from an existing building are recycled, it would take more than 65 years for a new energy-efficient building to balance the energy and material resources lost by demolishing it. Moreover, it is sometimes possible to economically enhance the secondary raw materials reclaimed from demolition (Paleari and Campi-

oli, 2015) by considering the recycled portion on the whole life cycle of the building as environmentally positive (Blengini, 2009).

Itard e Klunder (2007) compare the effects of different refurbishment intensities in two urban renewals in the Netherland. Assuming the useful life cycle of the refurbished building as starting point, they use as indicators the amount of material, energy and water consumption, and generated waste to demonstrate that the return time of the environmental impacts decreases by using constructive solutions with lower embodied energy. Rasmussen and Birgisdóttir (2016) apply a simplified LCA procedure based on EN 15978 to verify the return time of environmental impacts in a dwelling renovation in Denmark, on 50 years of useful life after the intervention. They consider only the embodied energy of

18 anni sono inferiori rispetto a quelli che avrebbe l'edificio non riqualificato; complessivamente, gli impatti totali si riducono del 25-45%. In aggiunta, la riqualificazione del costruito richiede anche valutazioni di tipo economico, perché l'estensione del ciclo di vita utile di un edificio dipende dalle condizioni di degrado iniziali e dal costo delle alternative di intervento in funzione degli obiettivi prestazionali richiesti (Filippi, 2015; Ferreira *et al.*, 2016). A partire dalle prestazioni residue dell'esistente, l'analisi LCC permette di comparare le alternative di efficientamento energetico o di valutare il periodo di ritorno dell'investimento rispetto al costo globale in funzione del ciclo di vita del fabbricato (Di Giuseppe *et al.*, 2016). Altri autori, utilizzando un metodo di analisi combinato LCC e LCA per individuare il tipo di intervento da attuare e comparando un'ipotesi di riqualificazione dell'involucro con una di demolizione e ricostruzione, dimostrano che a parità di prestazioni energetiche, la riqualificazione risulta preferibile sia per i minori costi di demolizione (De Angelis *et al.*, 2013) che, considerando soltanto gli impatti ambientali, per il risparmio di risorse materiali (Thomsen *et al.*, 2003).

Emerge quindi che le metodiche di valutazione degli effetti ambientali in ottica di ciclo di vita e gli strumenti per comparare riqualificazione, demolizione e nuova costruzione sono in continua implementazione (Baker, Moncaster e Al-Tabbaa, 2017). I risultati variano in funzione dei confini del sistema prescelto e degli assunti adottati; inoltre, la difficile reperibilità di informazioni su processi costruttivi e materiali antichi (o non più in produzione) non sempre garantisce adeguati livelli di affidabilità del calcolo degli impatti pregressi (Menzies, 2011; Gaspar e Santos, 2015). Tuttavia, l'approccio LCA *based*, può contribuire ad

cradle to gate phase of added materials, the demolition waste management energy and the annual primary energy consumption after refurbishment. The study demonstrates that all the impacts associated to the intervention after 18 years are lower than those of a building-as-usual (BAU); overall, the total impact decrease by 25-45%.

Furthermore, refurbishment calls also for economic evaluations, since the life cycle extension of a building depends on both its decay conditions and the cost of the alternative solutions, which are devised to get certain performance requirements (Filippi, 2015; Ferreira, *et al.* 2016). Starting from residual performances of the existing construction, the LCC analysis is useful to compare the alternative options of energy efficiency or to evaluate the return period of the investment on the global cost, according to the building life cycle

Indicatori	Unità di misura
I1 Quantità di materiali preesistenti	ton
I2 Energia incorporata nei materiali preesistenti (EE) ed emissioni evitate (EC)	MJ/Kg > KgCO ₂ equ/kg
I3 Rifiuti prodotti dalla rimozione di materiali non idonei	ton
I4 Energia incorporata nei materiali scartati	(-) MJ/kg
I5 Efficacia materica dell'elemento tecnico (rapporto tra materia residua e materia originale)	%
I6 Dispendio energetico ed emissioni associabili ai materiali aggiunti (cradle-to-gate life cycle impacts)	MJ/Kg > KgCO ₂ equ/kg

orientare alcune scelte progettuali, oltre a confermare la rilevanza del bilancio ambientale predittivo quale parametro cruciale di valutazione.

Il recupero e riuso di quanta più materia possibile appare quindi una strategia efficace per contenere gli impatti ambientali associati all'intervento di riqualificazione. Ciò richiede di determinare le prestazioni tecnologiche "residue" del manufatto esistente (Monsù Scolaro, 2018), limitando l'aggiunta di nuove risorse, quindi di nuova energia incorporata e CO₂ che possono ulteriormente ridursi con l'impiego di materiali a basso impatto ambientale. Per quantificare in modo attendibile le prestazioni residue, è necessario operare alla scala del progetto esecutivo e indagare la configurazione degli elementi tecnici e le modalità con cui assicurare l'efficace integrazione tra i materiali e componenti preservati e aggiunti, controllando contestualmente gli effetti ambientali indotti dal soddisfacimento dei requisiti di progetto (BRE, 2016).

Il controllo degli impatti ambientali alla scala del progetto esecutivo: metodologia

Il D.Lgs. 50/2016 - Codice dei Contratti Pubblici definisce il progetto esecutivo come il livello di progettazione a cui «ogni elemento sia identificato in forma, tipologia, qualità, dimensione e prezzo» nonché inquadrato rispetto al ciclo di vita dell'edificio. Nel progetto di riqualificazione, in particolare, è a questo stadio che le valutazioni delle prestazioni residue degli elementi tecnici e del livello di degrado dei materiali si concretizzano in decisioni progettuali, definendo quali e quanti elementi salvaguardare, quanti dismettere e quante nuove risorse introdurre. Ciò presuppone che alla prassi ormai

(Di Giuseppe *et al.*, 2016). Combining LCC and LCA analysis in order to identify the best intervention to do and comparing a hypothesis of envelope refurbishment with one of demolition and reconstruction, other authors show that for equal energy performance the refurbishment is preferable. This is for two principal reasons: lower costs respect demolition (De Angelis *et al.*, 2013) and saving of material resources only if the environmental impacts are accounted (Thomsen *et al.*, 2003).

This review shows that both methods for assessing environmental impacts in a life cycle perspective and tools for comparing refurbishment, demolition and new construction are constantly being updated (Baker, Moncaster e Al-Tabbaa, 2017). Results widely vary depending on the system boundaries and the key assumptions; in addition,

not always adequate levels of reliability on the evaluation of prior impacts are assured, due to the difficulty in finding information on construction processes and on ancient materials - or no longer in production (Menzies, 2011; Gaspar and Santos, 2015). Nevertheless, the LCA based approach can support design choices; as well as it proves the predictive environmental balance to be a crucial evaluation parameter.

Hence, the maximum recovery and reuse of matter appears effective to contain the environmental impact caused by the refurbishment. This requires the "residual" technological performances to be defined (Monsù Scolaro, 2018), limiting both the addition of new resources and new embodied energy and CO₂ emission, that can be furtherly reduced through materials with low environmental impact. It should be necessary to act at detailed design level

diffusa del "bilancio delle prestazioni tecnologiche", si affianchi quella della redazione del "bilancio degli impatti ambientali", che invece richiede ancora affinamenti e sviluppi (BRE, 2016; Baker, Moncaster e Al-Tabbaa, 2017; Berg e Fuglseth, 2018).

La metodologia sviluppata approfondisce il bilancio degli impatti ambientali, guardando all'edificio nel suo complesso. L'edificio esistente è analizzato a partire dal rilievo geometrico fino all'analisi dei materiali costituenti, condotta alla scala del dettaglio esecutivo, per definire le prestazioni tecnologiche residue degli elementi tecnici. Quindi, attingendo ai dati dell'ICE (*Inventory of Carbon & Energy - Release 2.0*), si stimano la quantità di materia, energia incorporata e CO₂ emessa relative alla fase *from cradle to gate* dei materiali esistenti che risultano ancora idonei. Infine, si formulano le scelte progettuali di intervento e si redige un bilancio ambientale, contabilizzando sia gli impatti evitati -compresi quelli relativi al possibile riutilizzo di materia dismessa- sia gli impatti causati dai materiali aggiunti.

La procedura si articola in 4 fasi e utilizza un set di indicatori di impatto selezionati e verificati in altre ricerche, efficaci rispetto agli obiettivi ambientali fissati (Fig. 1).

- 1) Rilievo e rappresentazione grafica di:
 - geometria;
 - struttura, sistema costruttivo, elementi tecnici e materiali.
- 2) Analisi e valutazione:
 - della quantità di materia incorporata nell'edificio (I1);
 - dell'energia incorporata (*embodied energy*, EE) e dell'impronta di carbonio (*carbon footprint*, EC) (I2);
 - dello stato di degrado dei materiali;
 - delle prestazioni residue degli elementi tecnici.

in order to accurately quantify the residual performances, by verifying pre-existing building material position to ensure effective integration with new materials and components. That means, at the same time, to check the environmental effects induced by the design requirements fulfilment (BRE, 2016).

Control of environmental impacts at the level of detailed design: methodology

D.L. 50/2016 - Code of Public Contracts defines the executive design as the level to which «each element is identified in form, type, quality, size and price» and referred to the life cycle of the building. In particular, in the refurbishment design it is the stage at which the evaluations of residual performance of the technical elements and of the level of material decay turn in

design decisions: how many elements to maintain, to remove and how many new resources to add. This implies that the now conventional "technological performance balance" is accompanied by an "environmental impact balance", practice which instead still requires refinements and developments (Rasmussen and Birgisdóttir, 2016; BRE, 2016; Baker, Moncaster and Al-Tabbaa, 2017; Berg and Fuglseth, 2018). The proposed method is based on the latter, considering the whole building. The existing construction is examined from geometric survey up to the analysis of materials at the detailed drawing scale, aiming at defining the residual performances of technical elements. Then, the quantity of matter, embodied energy and CO₂ emitted from cradle to gate of the materials that are still appropriate are estimated, drawing the data from ICE (Inventory of Carbon

- 3) Verifica e valutazione:
 - della materia da demolire e della quantità di rifiuti prodotti (I3);
 - della perdita di energia incorporata relativa alla demolizione (I4);
 - della prestazione e dell'“efficacia prestazionale residua” degli elementi tecnici al netto delle demolizioni (I5);
 - dei nuovi limiti di prestazione richiesti.
- 4) Individuazione di alcune alternative tecniche di pari prestazione, individuate sulla base di una matrice requisiti tecnologici/strati funzionali in cui figurano sia i materiali preesistenti che quelli da integrare. Confronto, valutazione e scelta della soluzione tecnica che presenta il miglior profilo in base al bilancio ambientale dei valori di EE ed EC correlati alla materia conservata, recuperata e riutilizzata dalle demolizioni o aggiunta.

È importante specificare che, valutati i degni del manufatto e note le demolizioni di materia degradata, la prestazione è calcolata al netto delle demolizioni, quindi l'efficacia prestazionale residua (espressa in %) è il rapporto tra la quantità di materia ancora in grado di contribuire alla prestazione dell'elemento tecnico e quella originaria. Espressa anche in termini di EE, rappresenta l'energy embodied ancora efficace che in ottica LCA non ha completato il suo ciclo di vita utile (Rasmussen e Birgisdóttir, 2016). Nello specifico, il valore 100% indica che il materiale è in buono stato di conservazione e non sono necessarie sottrazioni di materia; lo 0% indica la totale rimozione del materiale, mentre “n.c.” riguarda aspetti non direttamente valutabili attraverso il rilievo. La metodica permette così di ottenere una schedatura analitica dell'edificio che, grazie alla presenza degli indicatori ambientali

& Energy - Release 2.0). Lastly, some design alternatives are formulated and an environmental balance for each is drafted: the evaluation takes into consideration both the avoided impact – including those related to the possible re-use of dismantled building material – and the ones caused by the addition of new materials.

The procedure is broken down into 4 steps and involves a set of impact indicators selected and validated from other studies, which are effective to the environmental goals defined (Fig. 1).

- 1) Survey and graphic representation of:
 - geometry;
 - structure; construction system; technical elements and materials.
- 2) Analysis and evaluation of:
 - the quantity of matter within the building (I1);
 - the embodied energy (EE) and

carbon footprint (EC) (I2);

- the condition of conservation or decay of materials;
- the residual technological performances of technical elements.

3) Assessment of:

- the matter to demolish and the amount of demolition wastes produced (I3);
- the embodied energy lost due to demolition (I4);
- the performance and the “residual matter efficiency” of each technical element except the demolished portions (I5);
- new performance thresholds.

4) Identification of technical alternatives of equal performance, based on a technological requirements/functional layers matrix which includes both existing and new materials. Hence comparison and selection of the best solution in terms

associati sia ad ogni singolo elemento tecnico che al manufatto nel suo insieme, integra l'approccio tecnologico-prestazionale di indagine sul patrimonio costruito. Inoltre, in fase progettuale la schedatura supporta le alternative di riqualificazione degli elementi tecnici associandovi un profilo ambientale corrispondente e, a parità di prestazione tecnologica, orienta verso interventi che valorizzano la materia preesistente riducendo gli input di nuova materia, energia incorporata e CO₂ emessa.

Il caso studio

La sperimentazione ha riguardato un edificio di interesse storico nel territorio di Surigheddu-Mamuntanas ad Alghero (SS), facente parte di un'ampia tenuta agricola (Fig. 2) che a partire dalla fine del XIX secolo ha conosciuto periodi di grande espansione fino all'attuale abbandono. A tutt'oggi, salvo il restauro della palazzina principale, sede di un centro di ricerca universitaria, nessun'altra iniziativa di valorizzazione è stata avviata.

FASE 1 e 2. Il rilievo ha restituito un manufatto di dimensioni eccezionali, quasi 100 metri per 10, con struttura portante perimetrale in muratura di mattoni, blocchi di trachite e pietrame; una doppia serie di pilastri in mattoni regge internamente le volte a vela a sesto ribassato del piano primo. Il solaio controterra è realizzato su vespaio, mentre la copertura è retta da ampie capriate e orditura superiore in legno. L'ordinata distribuzione dei carichi e delle sollecitazioni hanno garantito nel tempo la stabilità della costruzione, tuttavia l'incuria ha causato estesi degni delle superfici esterne (Fig. 3). Il rilievo puntuale e disegni di dettaglio degli elementi tecnici ha permesso di verificare l'incidenza percentuale in peso dei materiali presenti (I1) per poi calcolare l'EE e l'EC di ognuno². Attraverso una matrice requisiti tecnologici/

of environmental balance: that is, values of EE and EC of the material preserved, recovered and reused by demolition or added.

It is important to specify that once assessed the building decay and the relative matter to remove, the performance is computed net of demolitions. Consequently, the index of residual matter efficiency (%) of the technical element is the ratio between the amount of matter still effective and the original one. Also formulated in terms of EE, it represents the still effective embodied energy: that means, from an LCA perspective, it has not completed its useful life cycle yet (Rasmussen e Birgisdóttir, 2016). In particular, 100% means the material is in good state of preservation and no material subtraction is required; 0% suggests the material is entirely to remove; while “n.c.” refers to aspects not directly measur-

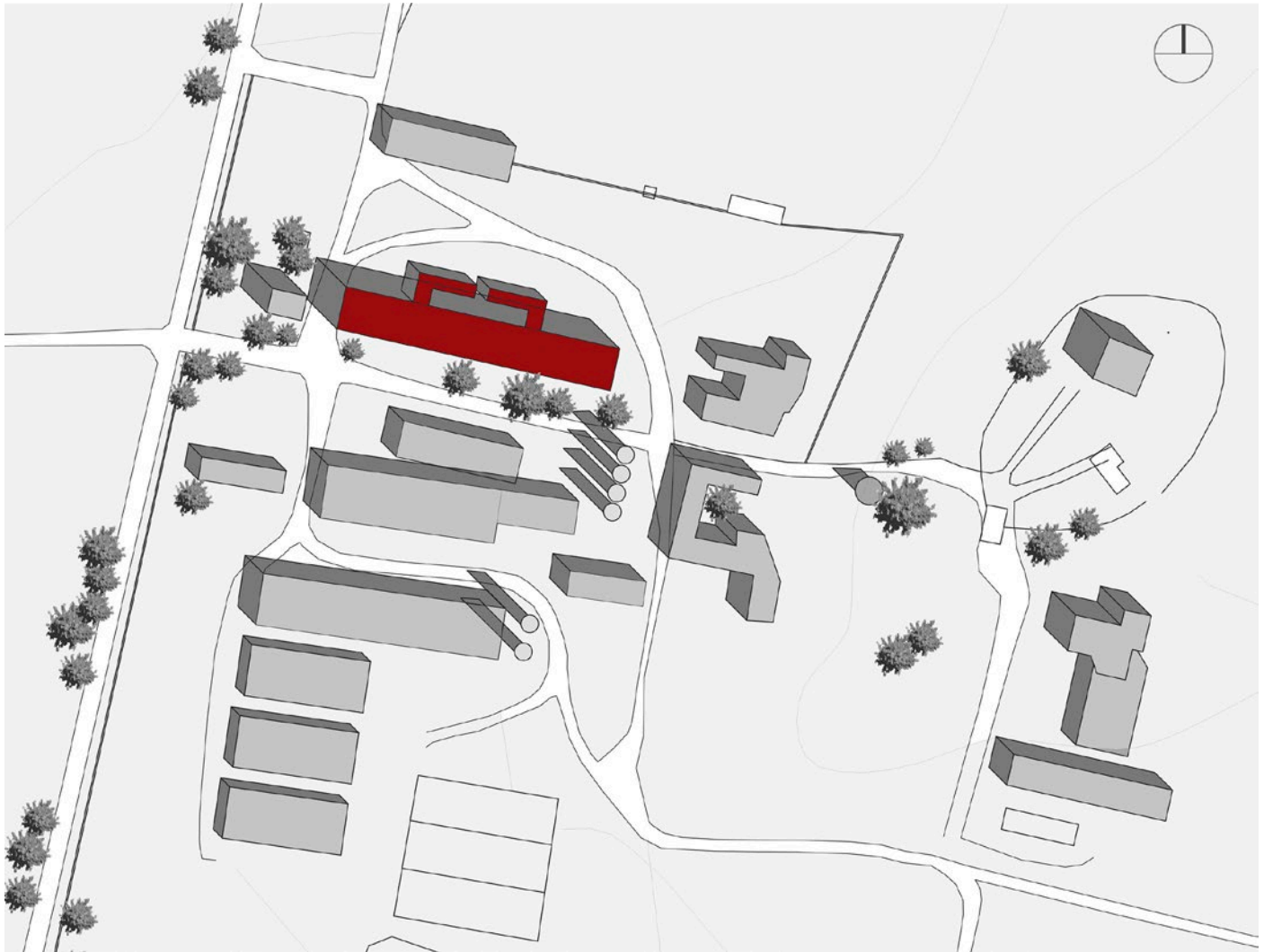
able through the survey.

Hence the method provides an “identikit” of the building that combine the technological-performance approach of investigation on the built heritage with environmental indicators associated both to technical elements and the building as a whole. Furthermore, in the design phase this “data-sheet” equips the alternatives of refurbishment of the technical elements with their corresponding environmental profile. Given equal technological performance, this should orient the design towards enhancement of pre-existing materials, thus reducing new input of material, embodied energy and CO₂ emissions.

The case-study

The method has been tested on a historical building in the Surigheddu-Mamuntanas area, Alghero (Italy).

02 |



The construction is part of a large rural estate (Fig. 2), which since the XIX century experienced great expansion times until the current abandon. Up to date only the main building has been restored and hosts a university research centre; no other interventions has been undertaken.

STEPS 1 and 2. A building of exceptional size emerged from the survey: about 100x10 meters. The bearing wall is in masonry of bricks, trachyte blocks and stones; inside, a double series of brick pillars support the lowered arched ceiling of first floor. The ground floor slab is on crawl space; while the roof is supported by wide trusses and upper wooden framework. Although

the homogeneous distribution of loads and stresses has preserved the static stability over time, the negligence has caused extensive decays of the external surfaces (Fig. 3).

The accurate survey and the detailed drawings of the technical elements allow to determine the weight of pre-existing materials (I1) and then to calculate their EE and EC (I2). Following, a technological requirements/functional layers matrix was connected with the detailed drawing of each technical element: the performance deficits emerged and therefore the functional layers to be integrated in order to meet the requirements (Fig. 4). This allows both to locate the criticalities of the

technical element and to select alternative technical solutions for the refurbishment.

The major rates of embodied energy and CO₂ concern the mass of bricks and stones used in masonry, floor, crawl space and fills. However, being aware of the approximation of EE and CO₂ data referred to ancient materials, the outcomes represent basically the emission (kg CO₂ equ) potentially avoided for the construction of an equal building (Fig. 5).

STEP 3. Having identified the decays of technical elements and the quantity of matter to be demolished, the residual performance efficiency of each material on the belonging technical ele-

ment has been calculated: walls (SEV), ground floor (COI), roof (CS). The result directly depends on the decay of the examined material, but may vary also depending on the alternatives of intervention. In this case two possible solutions have been formulated at the detailed design scale: Fig. 6 compares the quantities of energy associated with the maintenance, loss, addition of recovery of matter for each.

STEP 4. The envelope (SEV) has been examined in depth, referring to current thermal transmittance limits². Two alternative solutions for thermal insulation from the inside were compared: cork ($\lambda=0,044$; 12 cm) and rock wool ($\lambda=0,033$; 10 cm), that respec-

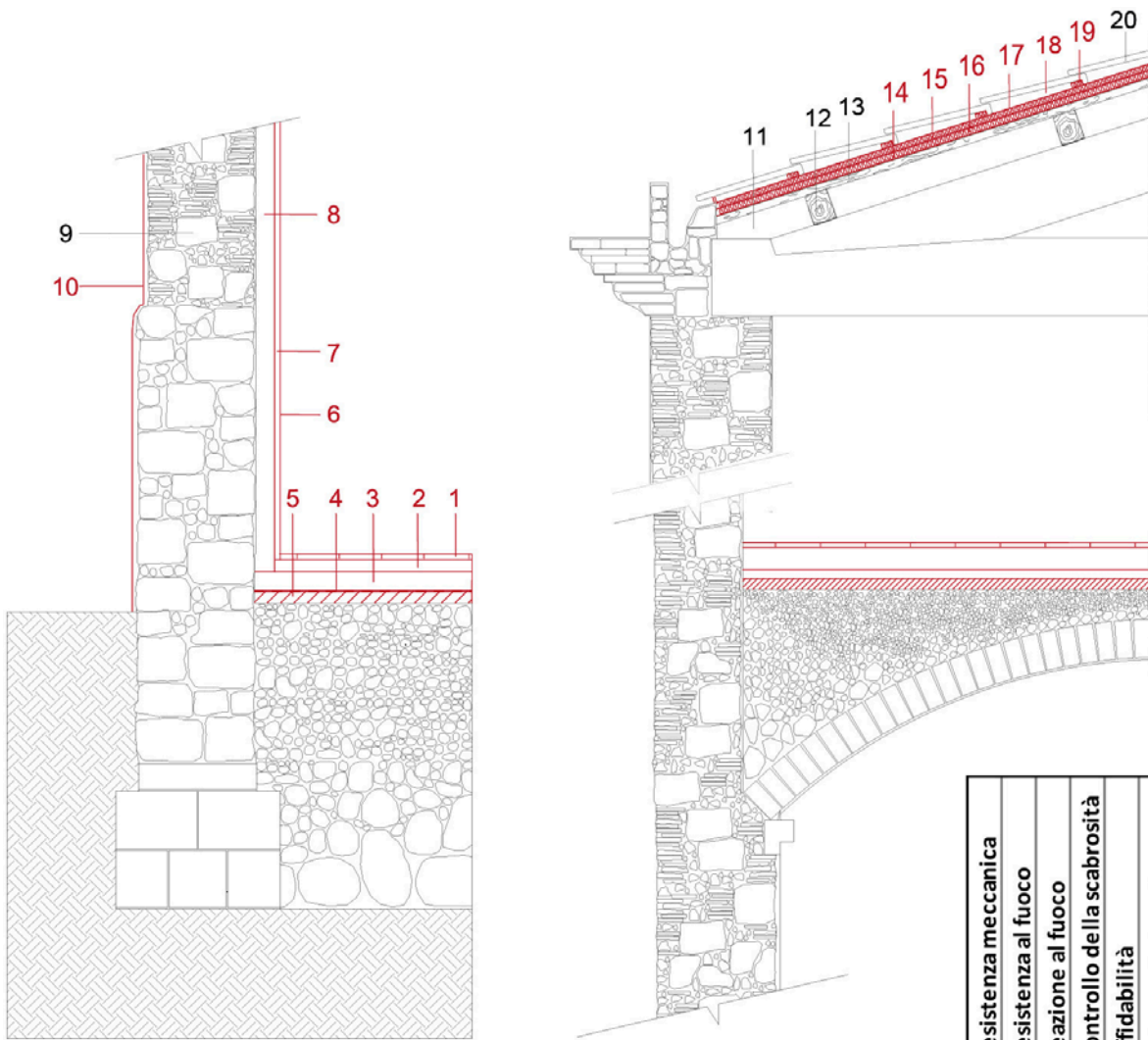
strati funzionali, interfacciata con il dettaglio esecutivo dell'elemento tecnico, sono stati evidenziati i deficit prestazionali e quindi gli strati funzionali, ovvero i materiali, da integrare per soddisfare i requisiti richiesti (Fig. 4). Ciò permette sia di localizzare i punti deboli dell'elemento tecnico sia di selezionare le soluzioni tecniche alternative di intervento. Gli impatti maggiori di energia incorporata e CO₂ riguardano la massa di mattoni e pietrame impiegati nelle murature, solai, vespai e riempimenti. Tuttavia, consapevoli delle approssimazioni relative ai dati di EE e CO₂ emessa riferiti alla produzione di materiali antichi, i valori emersi esprimono in particolare le emissioni (in kg di CO₂ equ) potenzialmente evitate per costruire un edificio pari all'esistente (Fig. 5).

FASE 3. Verificati i degradi degli elementi tecnici e dei quantitativi di materia da demolire, è stata calcolata l'efficacia prestazionale residua di ogni materiale rispetto all'elemento tecnico di appartenenza: struttura di elevazione verticale (SEV), solaio di base (COI), copertura (CS) e partizione interne orizzontali

(PIO). Le percentuali risultano dipendere direttamente dallo stato di conservazione del materiale analizzato, ma possono variare in funzione delle alternative di intervento.

FASE 4. Quindi, sono state elaborate e comparate due soluzioni tecniche alternative di intervento per ogni elemento tecnico, confrontando le quantità di energia associate al mantenimento, perdita, addizione o recupero di materia (Fig. 6). Così, per l'isolamento termico delle murature dall'interno: il sughero ($\lambda=0,044$ da 12 cm) e la lana di roccia ($\lambda=0,033$ da 10 cm), aventi rispettivamente valori di EE=4MJ/kg e EC=0,19 kg CO₂ equ/kg ed EE=16,8MJ/kg e EC=1,12 kg CO₂ equ/kg (fig. 7). Le alternative indagate hanno evidenziato un aumento di EE del 9,8% (+304,26 MJ/m²) ed EC del 2,63% (+20,61 CO₂ equ/m²) impiegando il sughero; e del 13,0% di EE (+405,06 MJ/m²) e del 3,62% di EC (+28,29 CO₂ equ/m²) con la lana di roccia (Fig. 8). Ipotizzando una soluzione alternativa con isolante in pannelli da 10 cm in EPS ($\lambda=0,033$; EE= 84,7 MJ/kg e EC=3,42 kgCO₂ equ/kg) l'EE aumenterebbe di +4972,86 MJ/m² crescendo di





			Resistenza meccanica	Resistenza al fuoco	Reazione al fuoco	Controllo della scabrosità	Affidabilità	Isolamento termico	Isolamento acustico	Resistenza all'irraggiamento	Tenuta all'aria	Tenuta all'acqua
COI Chiusura orizzontale inferiore	1. Piastrelle 2. Massetto 3. Isolamento termico 4. Strato di scorrimento 5. Massetto	Elemento di finitura in ceramica (2cm)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		Calcestruzzo alleggerito (5cm)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
SEV Struttura di elevazione verticale	6. Rasatura interna 7. Finitura interna 8. Isolamento termico 9. Muratura portante 10. Intonaco esterno	Pannelli in sughero (9cm)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		Membrana in HDPE	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
CS Chiusura inclinata superiore	11. Capriate 12. Orditura secondaria 13. Tavolato 14. Strato di separazione 15. Listelli 16. Isolamento termico 17. Membrana impermeabilizzante 18. Camera d'aria 19. Listelli di sostegno 20. Tegole	Elemento di finitura in cemento (10cm)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		Finitura a gesso	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		Pannello in cartongesso (12mm)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		Pannello in sughero (12cm)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		Conci irregolari di trachite	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		Finitura esterna (2cm)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		Legno	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		Legno	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		Legno	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		Foglio in PP (0,1mm)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		c.a. (4x15cm)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		Pannelli in sughero (12cm)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		Foglio in PET (0,1mm)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		3 cm	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		Legno	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		Cotto	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

05 | Embodied Energy (EE) e Carbon Energy (EC) di ciascun materiale, calcolate percentualmente rispetto all'elemento tecnico di appartenenza. Indicazione percentuale dei pesi di ciascuna compagine costruttiva rispetto all'intera massa dell'edificio
Embodied Energy and Carbon Footprint of each material, in percentage on each technical element. Percentage of the weight of each constructive portion with respect to the whole building mass

06 | Indicazione dell'efficienza materica di ciascun materiale all'interno dell'elemento tecnico, considerata anche l'EE residua e persa (dalla demolizione)
Matter Efficiency (IE) of each material within the technical element, including the residual and lost EE shares due to the demolition

07 | Grafico di confronto delle alternative progettuali rispetto all'EE e all'EC di ogni materiale adottabile (sughero e lana di roccia per l'isolamento dell'involucro)
Comparison of EE and EC of each material in intervention alternatives (cork and rockwool for the envelop insulation)

08 | Grafico di confronto dei bilanci complessivi relativi alle alternative progettuali, rispetto all'EE e all'EC considerando il recupero, riuso, perdita ed aggiunta di materia per raggiungere i requisiti prestazionali richiesti
Comparison of the total balances for the intervention alternatives, with respect to the EE and EC that include the reuse, recycle, lost, addition of matter to meeting the performance requirements

oltre il 500% e l'EC sarebbe pari a +184,68 kg CO₂ equ/kg, oltre il 900%.

Analogamente, sono stati analizzati il solaio di base e la copertura. Per il primo si è ipotizzata la rimozione del pavimento in ceramica, che andrà interamente in discarica perché irrecuperabile, perdendo 42 MJ/mq; la rimozione del sottofondo in cls, parte del quale si potrà riutilizzare *in situ* con un recupero del 70% (come da Reg. (UE) n. 305/2011) per un valore di EE pari a 181,02 MJ/mq e parte dovrà reintegrarsi per EE 82,08 MJ/mq. Poi si è confrontata l'incidenza di un pavimento in marmo da 3 cm rispetto ad uno in calcestruzzo "lisciato" in opera da 8 cm, ipotizzando in entrambi i casi l'utilizzo di pannelli in sughero per ridurre gli scambi termici verso il terreno. I risultati evidenziano una crescita di EE del 40% per il pavimento in marmo e del 59% per la soluzione in calcestruzzo.

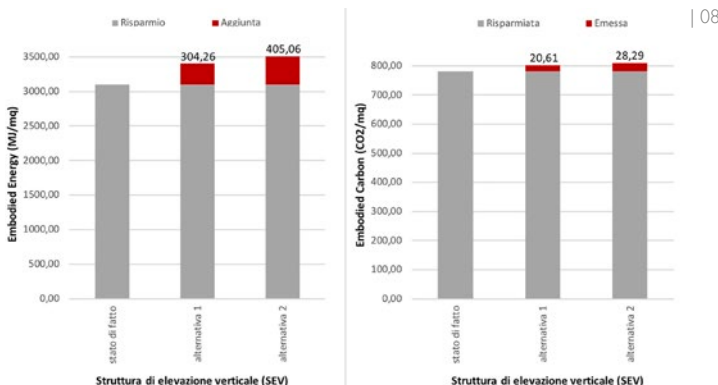
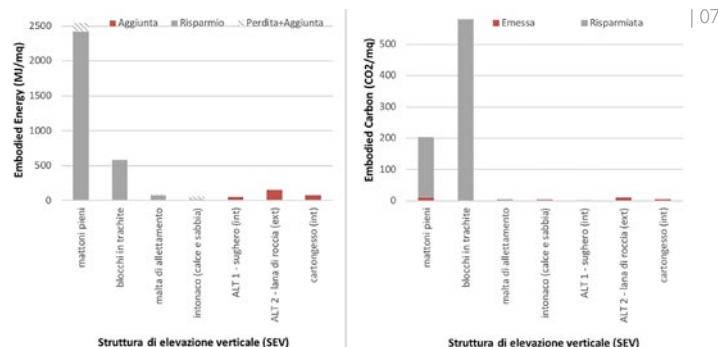
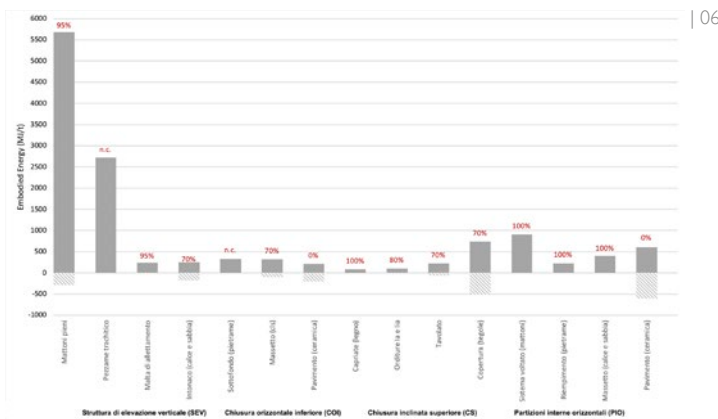
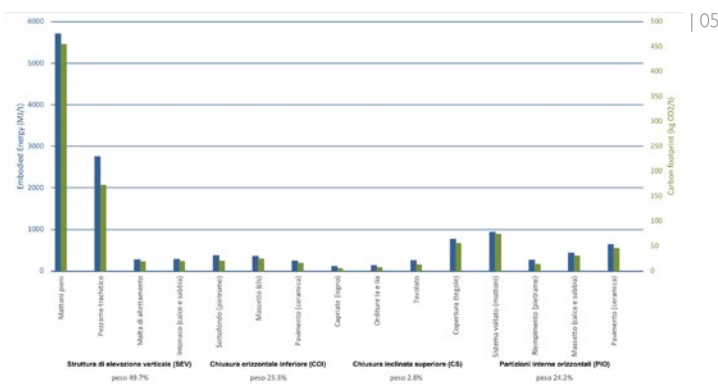
Anche per la copertura sono state analizzate due alternative, recuperando interamente la struttura lignea perché in buono stato di conservazione: nella prima, con isolante in sughero da 12 cm

tively count EE=4 MJ/kg, EC=0,19 kgCO₂ equ/kg and EE=16,8 MJ/kg, EC=1,12 kg CO₂ equ/kg (Fig. 7). The examined solutions show an increase in EE of 9,8% (+304,26 MJ/mq) and EC of 2,63% (+20,61 CO₂ equ/mq) using cork; an increase in EE of 13,0% (+405,06 MJ/mq) and EC of 3,62% (+28,29 CO₂ equ/mq) with rock wool (Fig. 8). Assuming a third option with EPS insulating panel, 10 cm thick ($\lambda=0,033$; E= 84,7 MJ/kg e EC=3,42 kgCO₂ equ/kg) the EE would increase of +4972,86 MJ/mq (over 500%) and EC would be +184,68 kg CO₂ equ/kg (over 900%).

Similarly, the ground floor and the roof have been investigated. Regarding the first one, the total removal of ceramic flooring – to dismantle because out of order – has been assumed, losing 42 MJ/mq. The removal of the concrete subfloor has been also con-

sidered: assuming to reuse part of it in situ (70% as by Reg. EU n.305/2011), that counts EE=181,02 MJ/mq, and to integrate the remaining part, adding EE=82,08 MJ/mq. Then the effects of 3 cm marble flooring compared to one in 8 cm of smooth concrete were compared, assuming in both cases to use cork panels for reducing thermal exchange with the ground. The results show an increase in EE of 40% for the former and 59% for the latter.

Also for the roof two possible solutions have been investigated, maintaining the whole wooden structure well preserved: the first with 12 cm cork insulation and air space produces a EE increase by 7,31%; whilst the second with 9 cm EPS panels without air space generates a EE increase by 11,98%. As foreseeable, this proves that with equal performance the environmental impact engendered by the polystyrene



e camera d'aria l'aumento dell'energia incorporata è del 7,31%; nella seconda, con pannelli di EPS da 9 cm senza camera d'aria, l'EE aumenta dell'11,98%. Ciò conferma, come già noto, che a parità di prestazione, gli impatti ambientali dovuti al processo di produzione del polistirene incidono maggiormente sulla scelta tecnica adottata.

Conclusioni

Come in altre sperimentazioni che indagano i bilanci ambientali associati alla riqualificazione del costruito, i limiti sono in particolare riferibili all'impiego di dati di inventario assunti per quantificare l'energia incorporata e la *carbon footprint* relativa a materiali di cui non si conoscono i relativi processi produttivi. Tuttavia, questo approccio permette una quantificazione orientativa del profilo ambientale del costruito, promuovendone il riutilizzo in funzione del suo reale potenziale ambientale nascosto (Fuertes, 2017).

La metodologia si dimostra utile per la valutazione e scelta delle alternative tecniche di riqualificazione a più basso profilo ambientale alla scala esecutiva. In particolare, l'indicatore di efficienza materica residua può accompagnare una schedatura del patrimonio edilizio esistente permettendo una valutazione preliminare delle alternative di riqualificazione in chiave life cycle. Ciò richiede comunque ulteriori applicazioni per affinare gli indicatori adottati e rendere sempre più affidabili i bilanci ambientali alle ipotesi di riqualificazione.

manufacturing have the greatest impact on the adopted technical solution.

Conclusions

As in other study concerning the environmental balance associated to refurbishment, the limits of the research regard in particular the use of inventory data for the assessment of EE and EC when the manufacturing process of certain materials is unknown. However, the approach provides an indicative evaluation of the building environmental profile, supporting its reuse according to the environmental potential value (Fuertes, 2017).

The method is useful for the assessment of alternative technical solutions for the refurbishment, hence for the selection of the alternatives with the lower environmental profile at the detailed design scale. In particular, the index of residual matter efficiency can be

associated with a classification of the existing building stock, allowing a preliminary assessment of refurbishment solutions from a life cycle perspective. Nevertheless, further developments are needed in order to improve the indicators and get increasingly accurate environmental balance for the refurbishment design.

NOTES

¹ Which count for about one third of the volume of wastes produced in EU-28 (Eurostat, 2016).

² Thresholds are based on DM "Requisiti minimi" 26 June 2015 for refurbished buildings (by 2021) and accordingly with the MIBACT's guidelines on energy efficiency of cultural heritage.

NOTE

¹ Che ammontano a circa un terzo del volume dei rifiuti prodotti in EU-28 (Eurostat, 2016).

² Parametri desunti dal DM "Requisiti minimi" del 26 giugno 2015 per edifici soggetti a riqualificazione edilizia (riferiti al 2021), in accordo con le linee guida del MiBACT sull'efficientamento energetico del patrimonio culturale.

REFERENCES

- Addis, B. (2006), *Building with Reclaimed Components and Materials. A Design Handbook for Reuse and Recycling*, Routledge, London.
- Baker, H., Moncaster, A. and Al-Tabbaa, A. (2017), "Decision-making for the demolition or adaptation of buildings", *Forensic Engineering*, Vol. 170, n. 3, pp. 140-156.
- Berg, F. and Fuglseth, M. (2018), "Life cycle assessment and historic buildings: Energy-efficiency refurbishment versus new construction in Norway", *Journal of Architectural Conservation*, Vol. 24, n. 2, pp. 152-167.
- Blengini, G.A., (2009), "Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: a case study in Turin, Italy", *Building and Environment*, Vol. 44, pp. 319-30.
- BRE (2016), "Sustainable refurbishment – how to better understand, measure and reduce the embodied impacts", available at: <https://www.bre.co.uk/filelibrary/Briefing%20papers/98660-Sustainable-Refurb-Briefing-Paper.pdf> (accessed 24 April 2016).
- CEN (2017), *Conservation of Cultural Heritage – Guidelines for Improving the Energy Performance of Historic Buildings*, TC 346, EN 16883:2017.

- Cossu, R. (2013), "The Urban Mining concept", *Waste Management*, Vol. 33 (3), pp. 497-498.
- De Angelis, E., Dotelli, G., La Torre, A., Pansa, G., Pittau, F., Porcino C. and Villa, N. (2013), "LCA and LCC based Energy Optimization of Building Renovation Strategies", *SB13 Graz - Sustainable Building Conference 2013*, pp. 77-86.
- ENEA (2016), *Rapporto Annuale Efficienza Energetica 2016*.
- European Commission (2014), *COM 398 - Towards a circular economy: A zero waste programme for Europe*, Brussels.
- European Commission (2014), *COM 445 final - Opportunità per migliorare l'efficienza delle risorse nell'edilizia*, Brussels.
- European Commission (2014), "Most residential buildings were built before thermal standards were introduced", available at: <https://ec.europa.eu/energy/en/content/most-residential-buildings-were-built-thermal-standards-were-introduced> (accessed 21 February 2019).
- European Commission (2015), *COM 614 - Closing the loop. An EU action plan for the Circular Economy*, Brussels.
- Eurostat (2016), *Key figures on Europe*.
- Ferreira, J., Pinheiro, M.D. and De Brito, J. (2013), "Refurbishment decision support tools review-Energy and life cycle as key aspects to sustainable refurbishment projects", *Energy Policy*, Vol. 62, pp. 1453-1460.
- Filippi, M. (2015), "Remarks on the green retrofitting of historic buildings in Italy", *Energy and Buildings*, Vol. 95, p. 15-22.
- Fuertes, P. (2017), "Embodied Energy Policies to Reuse Existing Buildings", *Energy Procedia*, Vol. 115, pp. 431-439.
- Gaspar, P.L. and Santos, A.L. (2015), "Embodied energy on refurbishment vs demolition: A southern Europe case study", *Energy and Buildings*, Vol. 87, pp. 386-394.
- Konstantinou, T. and Knaack, U. (2011), "Refurbishment of residential buildings: A design approach to energy-efficiency upgrades", *Procedia Engineering*, n. 21, pp. 666-675.
- Itard, L. and Klunder, G., (2007), Comparing environmental impacts of renovated housing stock with new construction, in *Building Research & Information*, Vol. 35 (3), p. 252-267.
- Menzies, G.F. (2011), *Embodied energy considerations for existing buildings*, Technical Paper 13 of Historic Scotland Research, Heriott-Watt University, Edinburgh.
- Mickaityte, A., Zavadskas, E. K., Kaklauskas, A. and Tupenaite, L. (2008), "The concept model of sustainable buildings refurbishment", *International Journal of Strategic Property Management*, Vol. 12, n. 1, pp. 53-68.
- Monsù Scolaro, A. (2018), "Embodied Energy e prestazione residua: misurare il valore ambientale dell'esistente", *Techne, Journal of Technology for Architecture and Environment*, Vol. 16, pp. 226-234.
- Munarim, U. and Ghisi, E. (2016), "Environmental feasibility of heritage buildings rehabilitation", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 58, pp. 235-249.
- Paleari, M. and Campioli, A. (2015), "I rifiuti da costruzione e demolizione: LCA della demolizione di 51 edifici residenziali", *Ingegneria dell'Ambiente*, Vol. 4, pp. 47-61.
- Pomponi, F. and Moncaster, A. (2017), "Circular economy for the built environment: A research framework", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 143, pp. 710-718.
- Preservation Green Lab (2011), "The Greenest Building: Quantifying the Environmental Value of Building Reuse", National Trust for Historic Preservation, available at: https://living-future.org/wp-content/uploads/2016/11/The_Greenest_Building.pdf
- Rasmussen, F.N. and Birgisdóttir, H. (2016), "Life cycle environmental impacts from refurbishment projects - A case study", *Central Europe Towards Sustainable Building 2016: Innovations for Sustainable Future*, pp. 227-284.
- Thomsen, A., and Van der Flier, K. (2002), "Updating the housing stock: the need for renovation based approaches", *Proceedings of the International Research Conference on Housing Cultures, Convergence and Diversity*, ENHR & Europaforum Wien.