

Elisabetta Palumbo^a, Stefano Politi^b,

^aInstitut für Nachhaltigkeit im Bauwesen, RWTH Aachen University, Germania

^bDipartimento di Architettura, Università di Bologna, Italia

elisabetta.palumbo@inab.rwth-aachen.de
stefano.politi2@unibo.it

Abstract. Lo studio si propone di valutare la relazione che intercorre tra l'impronta di carbonio prodotta dal miglioramento energetico dell'involucro edilizio, assunto come l'unità tecnologica che incide maggiormente nella definizione della performance energetica globale dell'edificio, e quella inglobata nei materiali che lo compongono. La finalità della ricerca è di osservare la relazione che intercorre tra la riduzione degli impatti dovuti alla fase operativa e la variazione degli impatti incorporati nei materiali e componenti impiegati per ottenere tali benefici, inclusi gli effetti indotti nella prestazione ambientale globale dell'intero processo.

Parole chiave: Involucro edilizio; Prestazione energetica; LCA; Energia inglobata; Impronta di carbonio.

Energia operativa ed energia inglobata: il livello ottimale di efficienza energetica

Da ormai diversi decenni la riduzione degli impatti ambientali relativi ai processi edilizi rappresenta uno dei principali obiettivi delle politiche comunitarie.

L'indirizzo normativo che sta consolidando maggiormente gli obiettivi di sostenibilità delle politiche europee e che sta inducendo, attraverso l'introduzione del concetto di *Nearly Zero Energy Buildings* (nZEB), azioni di cambiamento rilevanti sia nelle teorie progettuali sia nelle prassi tecnico-costruttive (D'Olimpo, 2017), è la recente Direttiva Europea 2018/844 (aggiornamento della *Energy Performance Building Directive* - EPBD 31/2010).

Benché il livello di prestazione andrebbe valutato durante l'intera vita dell'edificio, la EPBD considera il ciclo di vita principalmente dal punto di vista economico, tralasciando ogni riferimento alle implicazioni ambientali derivanti dalle fasi di produzione, costruzione, uso, mantenimento e fine vita.

Secondo alcuni autori (Jia e Crabtree, 2015; Copiello, 2017), la

minimizzazione del consumo energetico in fase operativa, se non opportunamente ponderata all'interno del bilancio energetico globale e, quindi, rispetto all'intero ciclo di vita dell'edificio, rischia di innescare il cosiddetto "paradosso di Jevons".

Questa teoria afferma che i miglioramenti apportati per aumentare l'efficienza di una risorsa possono farne aumentare il consumo, anziché diminuirlo, incrementando di conseguenza gli impatti ad esso connessi.

Ne consegue che, se il bilancio globale tra energia inglobata ed energia operativa lungo l'intero ciclo di vita risultasse non adeguatamente equilibrato, potrebbe verificarsi l'effetto opposto rispetto a quello atteso. Pertanto, al miglioramento delle prestazioni in fase di esercizio corrisponderebbe anche un indesiderato innalzamento del contenuto di risorse energetiche e degli impatti inglobati nei materiali (*embedded impacts*) utilizzati per realizzarlo, associabili alle più complesse operazioni di manifattura, messa in opera, manutenzione e fine vita.

Questa circostanza impone, pertanto, una riflessione approfondita circa le condizioni entro le quali sia possibile conseguire l'*optimum* tra performance energetica e riduzione degli impatti ambientali.

In letteratura, l'energia operativa (OE) viene spesso identificata quale componente predominante all'interno del bilancio globale (Verbeeck e Hens, 2010). Tuttavia, dalle analisi condotte in alcuni studi sulla relazione tra energia operativa ed energia inglobata (EE) relativamente a diverse tipologie di edifici, emerge che all'aumentare dei livelli prestazionali in esercizio, il rapporto tende, quasi linearmente, verso l'innalzamento della EE.

Improving building envelope efficiency: interaction between embedded energy and operational energy

Abstract. This study aims to evaluate the relationship between the carbon footprint produced by the energy improvement of the building envelope, assumed as the technological component that most affects the over-all energy performance of the building, and that embedded in the materials of which it is assembled. The purpose of this research is to observe the relationship between the reduction of impacts due to the operational phase and the variation of impacts incorporated in the materials and components used to obtain these benefits, including the effects induced in the overall environmental performance of the entire process.

Keywords: Building envelope; Energy performance; LCA; Embedded energy; Carbon footprint.

Operational energy and embedded energy: the optimal level of energy efficiency

For several decades now, the reduction of environmental impacts related to building processes has been one of the main objectives of EU policies.

The regulatory approach fostering the sustainability objectives of European policies and leading, through the introduction of the *Nearly Zero Energy Buildings* (nZEB) concept, to important changes in both design theories and technical practices (D'Olimpo D., 2017), is the new European Directive 2018/844 (updated *Energy Performance Building Directive* - EPBD 31/2010).

Although energy efficiency should be taken into account throughout the entire lifespan of buildings, the EPBD considers the life cycle mainly from an economic point of view, omitting any

reference to the environmental implications resulting from the production, construction, use, maintenance and end of life of buildings.

According to some authors (Jia and Crabtree, 2015; Copiello, 2017), the minimization of energy consumption in the operational phase, if not appropriately weighted within the global energy balance and, therefore, compared to the entire life cycle of buildings, risks provoking the so-called "Jevons paradox".

This theory asserts that improvements made to increase the efficiency of a resource can intensify consumption rather than decrease it, thus raising the associated impacts.

Consequently, if the overall balance between embodied and operational energy during the entire life cycle is not adequately weighted, opposite effects to those expected can occur.

Studiando la variazione di questo rapporto tra edifici tradizionali ed edifici ad alta efficienza energetica, Sartori e Hestnes (2007), attraverso una analisi bibliografica sull'uso dell'energia nel ciclo di vita di 60 edifici, situati in 9 differenti Paesi, osservano che la quota parte di EE può raggiungere anche il 46% del fabbisogno di energia totale negli edifici a basso consumo energetico e valori fino al 38% in quelli tradizionali.

Nella stessa direzione, Optis e Wild (2010), analizzando i risultati provenienti da 20 articoli scientifici relativi a edifici ad alta efficienza energetica, hanno evidenziato variazioni dal 2% al 51% dell'energia inglobata rispetto a quella totale nel ciclo di vita.

Più specificatamente, l'analisi eseguita su un tipico modello di casa passiva in Belgio (Stephan et al. 2013) ha rilevato valori di energia inglobata, includendo anche l'energia per il trasporto, del 40% rispetto a quella totale.

In ambito italiano, uno studio LCA condotto su una casa passiva in Umbria (Proietti et al., 2013), escludendo dal calcolo il contributo delle fonti rinnovabili, imputa all'involucro e agli impianti una quota di fabbisogno energetico lordo (GER) variabile tra il 48 e il 61%.

Più recentemente, Chastas et al. (2017), esaminando 90 edifici residenziali, hanno riscontrato che in quelli energeticamente efficienti la porzione di energia inglobata varia tra il 26 e il 57% del totale, riducendosi tra l'11 e il 33% in quelli passivi.

Partendo dalla evidenza che la EE rappresenta il 10-12% del consumo totale di energia delle residenze convenzionali nel ciclo di vita e il 31-46% in quelle che adottano livelli più elevati di isolamento, una ulteriore ricognizione della letteratura sulla variabilità

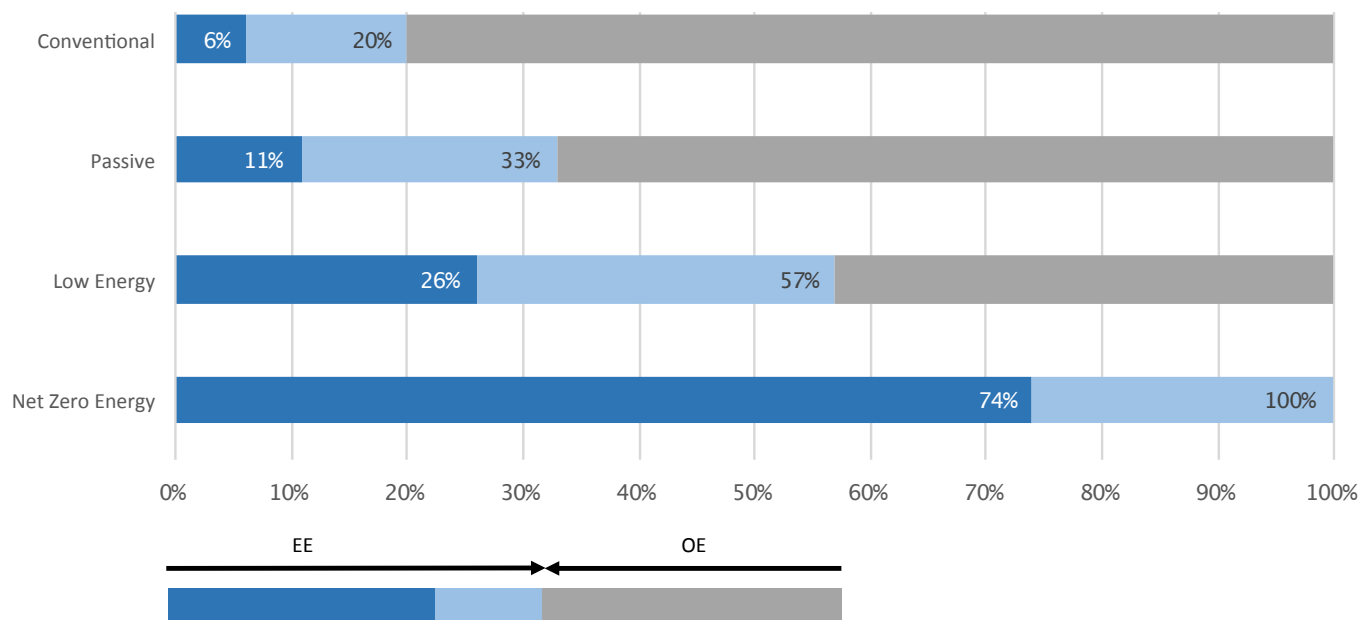
del rapporto tra EE ed EO, prevede che esso mutui ulteriormente entro il 2050 (Azari, Abbasabadi, 2018) (Fig. 1). In tale studio si presume che, all'aumento della EE dal 26% al 35% (ipotizzando un tasso di rinnovamento degli edifici esistenti dall'1,4 all'1,9%), possa corrispondere una diminuzione della OE% tra il 19% e il 46%.

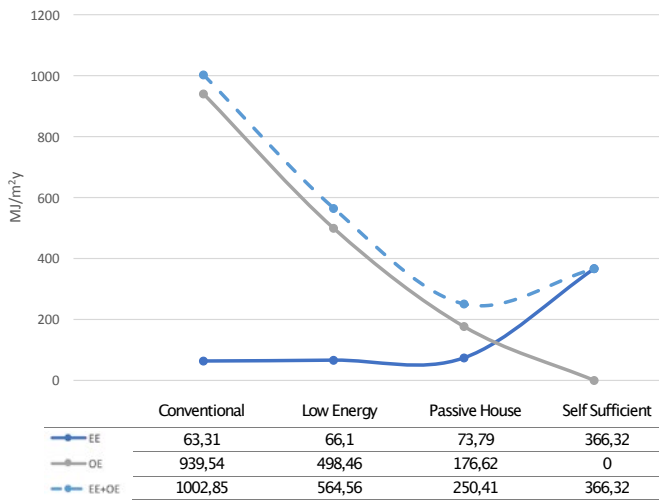
In conclusione, altre fonti sottolineano come la sola diminuzione dei consumi in esercizio, senza l'utilizzo di ulteriori cautele sulla prestazione termica dell'involucro e quindi sull'effettivo fabbisogno energetico degli edifici, non comporti evidenti benefici sul bilancio energetico finale (Paleari et al., 2016).

Riferendosi alla nozione complementare del ritorno di un investimento, Copiello (2017) si è interrogato su quale fosse il livello di efficienza energetica ottimale, tale da "ripagare" il maggior consumo di risorse nelle fasi non operative a fronte di minori consumi di esercizio nell'arco del ciclo di vita. Da ciò si deduce come una attenta progettazione delle caratteristiche tecnologiche volte alla riduzione dei consumi, di cui l'involucro costituisce un elemento fondamentale, porti al raggiungimento del livello ottimale di efficienza energetica globale mentre, incrementi eccessivi delle prestazioni, come ad esempio l'implementazione di tecnologie per l'autosufficienza energetica, rischiano di invalidare gli obiettivi di efficientamento (Fig. 2).

Questa ricognizione sullo stato dell'arte conferma la tesi del paradosso enunciata in premessa.

Uno dei più significativi e robusti indicatori che è possibile considerare per monitorare l'impatto ambientale derivato dai processi edilizi è il Potenziale di Riscaldamento Globale (*Global*





Warming Potential-GWP), espresso in kg di CO₂ equivalente, che misura il potenziale contributo al riscaldamento dell'atmosfera indotto da un gas, rapportato a quello caratteristico del CO₂ (European Commission, 2017). È pertanto evidente che le emissioni climalteranti dipendono in modo proporzionale dalla quantità di energia incorporata nei materiali, il cui apporto risulta pertanto non trascurabile nell'arco del ciclo di vita (Ibn-Mohammed et al., 2013). Conseguentemente, lo sfruttamento di risorse rinnovabili comporta una riduzione intrinseca di tale indicatore (Pelsmakers, 2012). Focalizzando l'attenzione sull'indicatore GWP, uno studio condotto sul carbonio inglobato negli edifici esistenti nel Regno Unito, individua valori tra il 10 e il 25% del totale delle emissioni imputate agli edifici inglesi (Anderson e Thornback, 2012).

Allo stesso modo, lo studio Life Cycle Assessment (LCA) condotto da Asdrubali et al. (2013) su tre differenti tipologie di edifici italiani – residenza indipendente, multi-familiare e edificio per uffici multipiano – rileva valori di GWP tra il 15% (per le residenze unifamiliari) e il 25% (per gli uffici), dei quali circa il 18% è da attribuire ai materiali e ai componenti impiegati.

Indeed, along with performance enhancement during operation, it would also correspond to an undesirable increase in the energy resources and impacts incorporated into the materials employed in the construction stage (embedded impacts), resulting from the more complex production phases, management (frequent maintenance cycles) and end of life of components. This circumstance should therefore foster a reflection on the conditions required to achieve the optimum balance between energy performance and impact reduction.

In the literature, operational energy (OE) is often identified as a predominant component within the global balance (Verbeeck and Hens, 2010). However, several studies on the relationship between operating and embedded energy (EE), as related to different types of buildings, highlight that when

performance level is enhanced during the operational phase, the ratio almost linearly leans towards the increase of embedded energy.

An analysis of the discrepancy of this relationship both for traditional buildings and edifices with high energy performance, Sartori and Hestnes (2007), through a bibliographic examination of the Life Cycle Energy Analysis associated with 60 case studies in 9 different countries, revealed that the EE can reach up to 46% of the total energy needs of buildings with low energy consumption and up to 38% for traditional ones.

Likewise, by analyzing the outcomes of 20 scientific articles on buildings with high energy efficiency, Optis and Wild (2010) detected variations from 2% to 51% of the embodied energy compared to the non-operating phases. More specifically, the investigation car-

Più recentemente lo studio di Din e Brotas (2016), condotto a partire da una ricognizione della letteratura relativa alle analisi LCA di edifici residenziali in Europa, ed ulteriormente approfondito attraverso lo studio di una casa passiva monofamiliare in Galles, evidenzia che il GWP risulta più elevato nelle fasi iniziali del processo (*from cradle to gate*).

Quanto finora detto rafforza il principio che un involucro particolarmente performante implica una più delicata gestione delle variabili sia energetiche che ambientali.

Obiettivi e metodologia

Partendo dall'assunto che l'involucro edilizio di un edificio assume un ruolo determinante nella definizione delle prestazioni termiche ed energetiche, costituendo il componente più rilevante dal punto di vista dimensionale e, pertanto, anche sotto il profilo ambientale (Azari, 2014), lo studio si propone di valutare la variazione dell'impronta di carbonio, espressa in kg CO₂ equivalente, a seguito di azioni di miglioramento energetico dell'involucro edilizio e degli effetti che esse inducono.

La finalità ultima è quella di osservare la correlazione tra la riduzione degli impatti dovuti alla fase operativa e la variazione degli impatti incorporati nei materiali e componenti impiegati per ottenere tali benefici, inclusi gli effetti indotti nella prestazione ambientale globale dell'intero processo.

Al fine di limitare le variabili e meglio focalizzare gli obiettivi dello studio, le analisi sono state condotte prendendo ad oggetto una residenza unifamiliare modellata specificatamente per le finalità prefissate.

Per poter meglio definire la relazione tra l'impronta di carbonio e la prestazione energetica dell'involucro, sono state simulate

ried out on a typical passive house in Belgium (Stephan et al., 2013) showed that the embedded energy amounted to 40% of the total, including energy for transport.

Within the Italian context, an LCA study conducted on a passive house located in Umbria (Proietti et al., 2013), excluding the contribution of renewable sources from the calculation, attributes a gross energy requirement (GER) of between 48 and 61% to envelope and technical installations.

More recently, Chastas et al. (2017), examining 90 residential case studies, acknowledged that in energy-efficient buildings embodied energy varies between 26 and 57% of the total, while, when buildings are passive, this number reduces to between 11 and 33%.

A further literature review on the inconsistency between embodied energy and the energy consumption of build-

ings during their life cycle (Azari R., Abbasbadi N., 2018) (Fig. 1), starting with the fact that EE represents 10-12% of the life cycle energy consumption in conventional buildings and 31-46% in those with enhanced envelope insulation, foresees a further change in the EE and EO ratio by 2050. In fact, with respect to an EE increase from 26% (assuming a renewal rate of 1.4% for existing buildings) to 35% (assuming a renewal rate of 1.9%), a decrease of between 19% and 46% of OE is expected.

In conclusion, other recent studies point out that minimizing energy consumption during operation, without additional cautions with respect to the thermal performance of a building envelope and, therefore, the actual energy needs, does not result in apparent benefits for the final energy balance (Palaeri et al., 2016).

alcune variazioni delle caratteristiche sia dell'involucro opaco, modificandone lo strato di isolamento termico, sia di quello trasparente, sostituendo la tipologia di infisso. In particolare, in quest'ultimo caso, sono state identificate le tre differenti configurazioni:

- A: infisso di partenza (termicamente meno efficiente);
- B1: incremento della prestazione termica dell'infisso;
- B2: incremento della prestazione termica dell'infisso e modifica della composizione materica del telaio, introducendo una quota di materiale riciclato.

Delle tre configurazioni così definite, si è proceduto a calcolarne la prestazione energetica (in termini di kWh/m² anno) e il profilo ambientale (in termini di kgCO₂ anno).

La determinazione del GWP incorporato nelle tre diverse configurazioni di infissi è stata condotta attraverso l'ausilio della banca dati tedesca Ökobaudat, limitando però l'analisi alla sola fase di produzione dei componenti (*from cradle to gate*).

Il caso studio

Rispetto agli obiettivi dello studio, volti all'analisi del solo involucro esterno, il modello preso come caso studio è stato definito con caratteristiche dimensionali, funzionali e tipologiche semplificate (Fig. 3). La tipologia costruttiva è quella tipica del tessuto costruttivo esistente nella zona ravennate (struttura in c.a., chiusure esterne e partizioni interne verticali in laterizio, solai in latero-cemento e copertura inclinata a doppia falda). Le geometrie sono elementari e non sono presenti ostruzioni di alcun genere, quali sporti ai piani superiori, presenza di vegetazione o di edifici adiacenti, tali da poter influenzare l'esito delle analisi.

Referring to the complementary notion of return on investment, Copiello (2017) explored the optimal level of energy efficiency capable of "repaying" the larger use of resources in the non-operational phases in order to achieve lower consumption during the life cycle. This prompts a consideration of how the meticulous design of the technological features of a building aimed at reducing consumption, such as a fundamental element like the envelope, leads to the achievement of the optimal level of global energy efficiency, while the excessive improvement of performance (such as the implementation of technologies for energy self-sufficiency) can invalidate the efficiency objectives (Fig. 2).

This recognition of the state of the art confirms the thesis of the paradox set forth in the premise.

One of the most significant and robust

indicators for monitoring the environmental impact deriving from building processes is the Global Warming Potential (GWP), expressed in kg of CO₂ equivalent, which measures the potential contribution of a gas to atmospheric warming compared to that of CO₂ (European Commission, 2017). It is evident, therefore, that climate-altering emissions depend proportionally on the amount of energy embedded into materials, whose contribution is therefore not negligible during the life cycle (Ibn-Mohammed et al., 2013). Consequently, the exploitation of renewable resources involves an intrinsic reduction of this indicator (Pelsmakers, 2012).

Focusing on GWP, a study conducted on embodied carbon relating to existing buildings in the UK shows values of around 10-25% of the total emissions attributed to the Eng-

Le configurazioni di involucro

La modellazione del caso studio, ipoteticamente collocato a Ravenna (Emilia-Romagna) è stata condotta con riferimento ai requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici di cui alla DGR 967/2015.

La Tab. 1 riassume i valori di trasmittanza termica degli elementi costituenti la struttura dell'edificio, corredata dei valori limite presenti nei riferimenti normativi.

Le stratigrafie relative alle diverse configurazioni di involucro opaco e i dettagli costruttivi dei nodi di connessione delle pareti esterne con la fondazione, il solaio e la copertura sono schematizzati in Tab. 2.

Mentre gli infissi selezionati presentano le caratteristiche elencate nella Tab. 3.

Analisi delle prestazioni nella fase di esercizio

L'operazione preliminare è stata quella di calcolare, tramite il software *Iris*, le trasmittanze termiche lineari nei nodi critici della struttura – connessioni tra pareti esterne, solai e copertura – verificando l'assenza di ponti termici.

Successivamente si è proceduto all'analisi energetica dell'edificio nelle diverse configurazioni di involucro utilizzando il software *Termo Namirial*, sviluppato secondo le disposizioni del D.M. 26/06/2015 e il metodo di calcolo previsto dalla UNI TS 11300.

Attraverso l'analisi è stato possibile determinare sia l'indice di prestazione energetica globale – rinnovabile (E_{pgl}) e non (EP_{gl_nren}) – che rappresenta il fabbisogno di energia primaria annuale su m², sia le emissioni di CO₂ associate al funzionamento annuale. Nel caso delle residenze (Tab. 4) il coefficiente EP_{gl_nren} comprende:

lish built environment (Anderson and Thornback, 2012).

Likewise, the Life Cycle Assessment (LCA) conducted by Asdrubali et al. (2013) referring to three traditional types of Italian buildings – detached houses, multi-family houses and office buildings – indicates GWP values between 15% (for single-family residences) and 25% for offices, of which around 18% pertain to the materials and components employed.

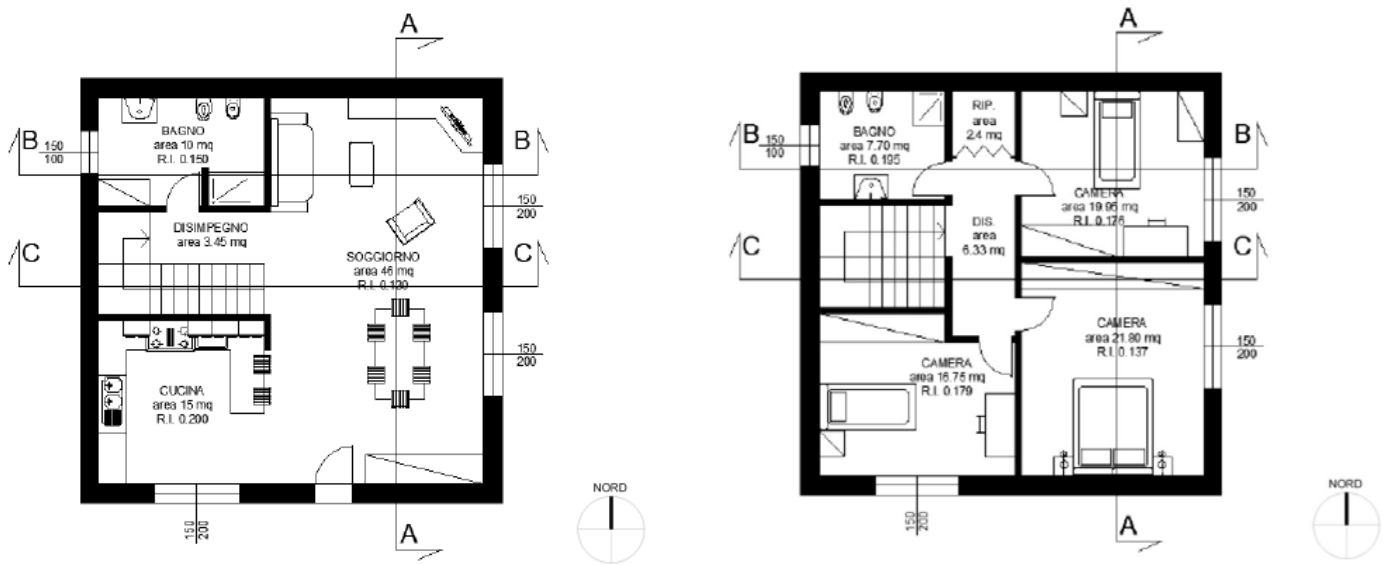
Finally, a more recent study (Din and Brotas, 2016) based on the literature review of the LCA of residential buildings in Europe, and further investigated through the analysis of a single-family passive house in Wales, shows that, by analyzing the entire life cycle, the GWP is higher in the initial stages of the process (from cradle to gate). This emphasizes the assumption that an envelope with particularly good

performances implies more delicate management of both energy and the environmental variables.

Objectives and methodology

Starting from the assumption that building envelopes play a crucial role in defining thermal and energy performances and represent the most relevant component from a dimensional and environmental perspective (Azari, 2014), this study aims to evaluate the variation in the carbon footprint, expressed in kgCO₂eq, as a consequence of the energy performance improvement of the building envelope and its induced effects.

The main purpose is to observe the correlation between the reduction of impacts related to the operational phase and the variation of impacts embedded in the materials and components employed to obtain these ben-



Tab. 1 | Valori di trasmittanza termica degli elementi costituenti la struttura dell'edificio, rispetto ai parametri limite indicati dai riferimenti normativi (DM 25/06/2015)
 Thermal transmittance values of the elements forming the building structure, with respect to the limit parameters indicated by the regulatory references (Ministerial Decree 25/06/2015)

Element	Maximum thermal transmittance U for climate zone E (Appendix B – Interministerial Decree 26.6.2015) [W/(m ² K)]	Thermal transmittance [W/m ² K]	Verified
Roof	0,250	0,205	YES
Ground floor slab	0,300	0,246	YES
External walls type A	0,300	0,244	YES
External walls type B	0,300	0,188	YES

| Tab. 1

efits, including the effects produced in the overall environmental performance of the whole process.

In order to limit the variables and to better focus on the objectives of the study, the analysis was conducted on a single-family house, designed specifically for the purpose.

In order to better ascertain the relationship between the carbon footprint and the energy performance of the building envelope, some variations of the opaque envelope attributes have been simulated, modifying the thermal insulation layer. Some modifications to the windows were also made, replacing the type of frame and selecting, in particular, the three following different configurations:

- A: starting window (thermally less efficient);
- B1: increase in the thermal performance of the window;

- B2: increase in the thermal performance of the window and modification of the material composition of the frame, introducing a portion of recycled material.

For the three described configurations, the energy performance (in terms of kWh/m² year) and the environmental profile (in terms of kgCO₂ year) have been calculated.

The calculation of the GWP of the three different window configurations was carried out based on the German Ökobaudat database, limiting the analysis to the production phase of the components (from cradle to gate).

The case study

With respect to the objectives of the study, aimed at analyzing the outer envelope, the model taken as a case study was modelled with simplified dimensional, functional and typologi-

cal characteristics (Fig 3). The type of construction coincides with the typical buildings of the Ravenna area (reinforced concrete structure, external and internal brick partitions, reinforced concrete and hollow tile mixed floor and inclined double-pitched roof). The geometries are elementary and there are no obstructions of any kind (such as overhangs on the upper floors, vegetation or adjacent buildings), in order not to influence the results of the analysis.

Outer envelope configurations

The modelling of the case study, ideally located in Ravenna (Emilia-Romagna) has been referred to the minimum energy performance requirements listed in the regional regulation DGR 967/2015.

Table 1 summarizes the thermal transmittance values of the elements form-

ing the building structure, also indicating the limit values indicated in the regulatory references.

The stratigraphy of the different opaque envelope configurations along with details of the connection nodes of the external walls with the foundation, the floor and the roof, are summarized in Tab. 2.

Regarding the selection of the windows, the attributes of the selected ones are listed in Tab. 3.

Performance analysis during the operational phase

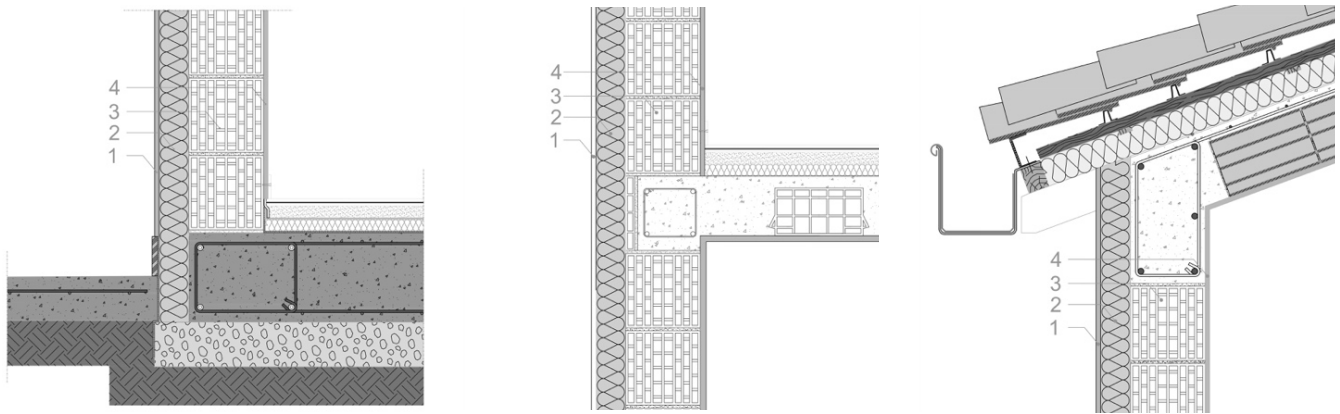
The preliminary action to define energy performance during operation was to calculate, using *Iris* software, the linear thermal transmittances along the critical nodes of the structure (connections between the external walls, floors and roof), verifying the absence of thermal bridges.

Tab. 2 | Stratigrafie, proprietà, prestazioni e dettagli costruttivi dei nodi delle connessioni dell'involucro esterno
 Stratigraphy, attributes, performance and technical details of the connections with the outer envelope

Tab. 2 |

Stratigraphy	Config. A	Config. B
1. External plaster (mm)	15	15
2. XPS thermal insulation panel with graphite (mm)	100	140
3. Hollow bricks (mm)	300	300
4. Internal plaster (mm)	15	15
Attributes and Performance	Config. A	Config. B
Exposed thermal mass [Kg/m ²]	209,6	211,0
Thermal periodic transmittance [W/m ² K]	0,030	0,021
Thermal lag [h]	12,27	12,95
Total thermal transmittance [W/m ² K]	0,244	0,188

Connections technical details



1. Vertical wall - foundation

2. Vertical wall - slab

3. Vertical wall - roof

Subsequently, the energy analysis of the building for the different envelope configurations was carried out using *Termo Namirial* software, according to the provisions of Ministerial Decree 26/06/2015, and therefore adopting the calculation method described in UNI TS 11300.

Through the analysis, it was possible to establish both the global energy performance index – renewable and non-renewable: EPgl, nren – which represents the annual primary energy requirement per m² for the achievement of indoor comfort conditions, and the CO₂ emissions associated with the annual operation of the building.

For residential buildings, the EPgl, nren includes:

- winter air conditioning (EPw, nren);
- summer air conditioning (EPc, nren);
- the production of domestic hot water (EPw, nren);

- ventilation (EPv, nren).

The analysis outcomes are listed in Table 4.

Performance analysis during the pre-operational phase

The main reference adopted for calculating impact indicators is the Ökobau.dat dataset, the standardized database created for the German Federal Ministry for the Environment, Conservation of Nature, Construction and Nuclear Safety (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit - BMUB).

Recently, this database was taken as binding for the assessment of building sustainability according to the DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen), the only rating system that exploits the LCA approach for environmental aspects and the LCC (life cycle costing) approach for economic

aspects, in compliance with the CEN TC350 standards.

Before calculating the environmental impacts, it was necessary to define the quantities, and therefore the weight, of the technical solutions to be evaluated, starting with dimensional data and density.

Knowledge of the CO₂eq unit values related to the production phase (from cradle to gate) was used to compute the GWP and the non-renewable primary energy (PENR) values for the three different envelope configurations using a spreadsheet (Tab. 5).

Finally, a comparative analysis was made of the impacts associated with the different envelope configurations – opaque and glazed. The outcomes are illustrated respectively in the diagrams in Fig. 4 and 5.

Results

The analysis of the environmental balance related to the two phases of the life cycle of the building taken into account (production and operation), over a period of 25 years, allows us to observe how, although a better thermal performance of the envelope configuration (solution B resulting in a 1% reduction of primary energy consumption) can reduce the effects on the environment during the operating phase by 1.5%, the use of a thicker insulation layer (4 cm of XPS) and the installation of a better performing window in the B1 solution generates a 0.3% increase in the total impact (Fig. 6), caused by the intensification of the production phase.

On the other hand, if we keep the transmittance coefficient fixed and modify the material composition of the window frame, for example by

- la climatizzazione invernale ($EP_{h,nren}$);
- la climatizzazione estiva ($EP_{c,nren}$);
- la produzione di acqua calda sanitaria ($EP_{w,nren}$);
- la ventilazione ($EP_{v,nren}$).

Analisi delle prestazioni nella fase di pre-esercizio Come in precedenza detto, il calcolo degli indici di impatto è stato effettuato adottando il dataset presente in Ökobau.dat, la banca dati standardizzata realizzata su commissione del Ministero Federale per l'Ambiente, la Conservazione della Natura, la Costruzione e la Sicurezza Nucleare tedesco (*Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit* – BMUB).

Recentemente tale banca dati è stata assunta come vincolante per la valutazione di sostenibilità degli edifici secondo il DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen), uno dei pochi *rating system* per la sostenibilità degli edifici che prevede l'utilizzo della LCA per gli aspetti ambientali e della LCC (*Life Cycle Costing*) per gli aspetti economici, in conformità con gli indirizzi normativi del CEN TC350.

Preliminare al calcolo degli impatti ambientali è stata la definizione delle quantità e quindi dei pesi delle soluzioni costruttive da valutare, considerando le caratteristiche dimensionali e la densità. Pertanto, attraverso la conoscenza dei valori unitari di CO_2 eq relativi alla fase di produzione alla produzione (*from cradle to gate*), tramite un foglio di calcolo sono stati computati i valori di

Tab. 3 | Caratteristiche degli infissi selezionati
Selected windows attributes

Attributes	Typology		
	Type A	Type B1	Type B2
Glazing panels	Two	Three	Three
Frame type	Thermal break	Thermal break	Thermal break
Frame section (mm)	62	100	100
Sash section (mm)	69	117	117
Thermal transmittance glazing – Ug (W/m ² K)	0,9	0,6	0,6
Thermal transmittance frame - Uf (W/m ² K)	1,9	1,0	1,0
Thermal transmittance window - Uw (W/m ² K)	1,4	0,8	0,8
Frame material	Aluminium	Aluminium	Aluminium with recycled content
Material composition	100% pure aluminium	100% pure aluminium	49% pure aluminium, 20% recovery of aluminium scrap, 31% recovery of other metals scrap*

|Tab. 3

*Source: The Aluminium Association, EPD n. 4786092064.102.1

Tab. 4 | Esito dell'analisi energetica delle due configurazioni di involucro in termini di Indice di Prestazione Energetica Globale ed emissioni di CO_2
Result of the energy analysis of the two envelope configurations in terms of Global Energy Performance Index and CO_2 emissions

Parameters	Config. A	Config. B
$EP_{gl,nren}$ [kWh/m ² year]	46,4	45,9
$EP_{gl,ren}$ [kWh/m ² year]	36,5	33,8
CO_2 [Kg/m ² year]	9,3	9,1

|Tab. 4

GWP e quelli di energia primaria non rinnovabile (PENR) per le diverse configurazioni di involucro sia opaco che trasparente (Tab. 5).

In ultimo, si è proceduto all'analisi comparativa dei profili delle differenti configurazioni di involucro opaco e trasparente, i cui risultati sono illustrati, rispettivamente, opaco e trasparente, nei diagrammi delle Fig. 4 e 5.

Risultati

L'analisi del bilancio ambientale nelle due fasi del ciclo di vita dell'edificio analizzate – produzione ed esercizio – nell'arco temporale di 25 anni, ci permette di osservare come, nonostante una migliore prestazione termica della configurazione di involucro (soluzione B con riduzione dell'1% del consumo di energia primaria) consenta di diminuire gli effetti sull'ambiente durante la fase di esercizio dell'1,5%, l'utilizzo di uno strato più spesso di isolante (4 cm di XPS) e l'installazione di un infisso più performante (soluzione B1) generi un incremento dell'impatto totale dello 0,3%, causato dall'aumento degli impatti nella fase produttiva (Fig. 6).

Quando, invece, a parità di coefficiente di trasmittanza, si interviene sulla composizione materica del telaio dell'infisso, introducendo ad esempio una quota del 51% in peso totale di materiale di recupero (configurazione B2), si ottiene un miglioramento di circa lo 0,5% sulla configurazione B1 e di 0,15% sulla configurazione A.

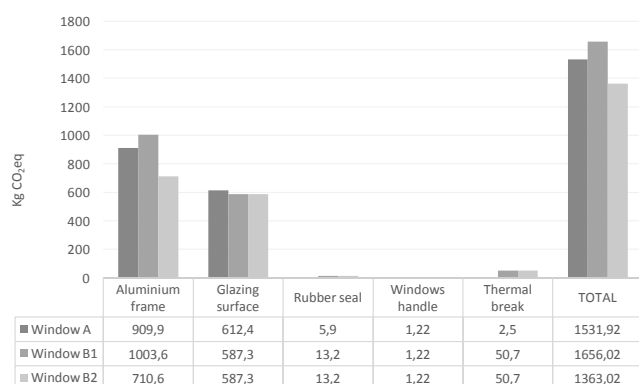
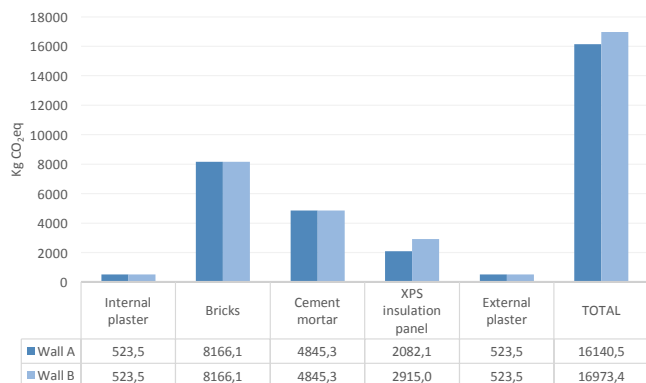
Per quanto queste percentuali possano sembrare ininfluenti, su un ciclo di vita di 25 anni, che è notoriamente molto limitato rispetto alla vita media della tipologia di edificio ipotizzata, questi valori corrispondono a circa 300 kgCO₂, corrispondenti

introducing 51% recycled material (configuration B2), an improvement of about 0.5% is obtained in the B1 configuration and 0.15% in the A configuration. Although these percentages may seem irrelevant, over a 25-year life cycle, notoriously very limited compared to the average lifespan of this kind of building, these values correspond to around 300 KgCO₂, approximately equivalent to the pollution that would be produced by crossing Italy from north to south (back and forth), with a medium-size diesel-powered car.

Discussion and study limitation

This study has investigated the relationship between the carbon footprint related to enhancing the energy performance of a building envelope, assumed as the technological unit that weighs most on the overall performance of

the building, and that embodied in the materials that constitute it. As a case study, the research selected the model of a small single-family residential house located in the Ravenna area, for which two additional envelope configurations, characterized by increasing levels of thermal resistance, have been simulated. For each configuration, the energy requirement during the operational phase and the related CO₂ emissions have been calculated (kgCO₂/m²year). Subsequently, basing on the German database Ökobau.dat, the environmental impact described by the global warming potential (GWP) indicator, associated with the "from cradle to gate" phase, was calculated for both the two different configurations involved in the energy analysis (A, B1), and for a third variant (B2), consisting of the use of a thermal performance window



approssimativamente all'inquinamento che si produrrebbe attraversando l'Italia da nord a sud e viceversa, con una autovettura di media grandezza alimentata a diesel.

Discussione e limitazioni dello studio

Lo studio ha analizzato la relazione che intercorre tra l'impronta di carbonio connessa all'incremento del livello di performance energetica dell'involucro edilizio, assunto come l'unità tecnologica che grava in mag-

equal to B1, but composed with 51% recycled material. This allowed us to estimate, for the three different configurations, the total GWP, respectively for the production phase and for the operating phase, and to appreciate the deviations in relation to the variation in energy performance and in the embodied carbon footprint. The analysis performed:

- confirms some evidence previously reported in the literature (Ibn-Mohammed et al., 2013), with regard to the correlation between the reduction in energy consumption during the operational phase and the increase in the impact of the embedded in materials and components employed, and with respect to the increasing weight that this latter aspect assumes when the energy efficiency of buildings is enhanced (Passer et al., 2012), thus eliminat-

ing the benefit produced during the operational phase;

- highlights how the use of components that – with the same functional performance – incorporate a percentage of recycled materials produces appreciably positive effects – approximately an 18% impact reduction in terms of kg-CO₂eq – on the observed circumstances and therefore represents an effective strategy to encourage the wider availability of building components containing recycled resources;
- allows us to formulate some considerations on the use of Life Cycle approach since the early design phases, both for new buildings and renovations, represent a valid tool for both the verification and validation of the environmental profile of the entire process and a guide for

Tab. 5 | Profilo LCA relativo alle tre configurazioni di involucro
LCA of the three different envelope configurations

| Tab. 5

OPAQUE ENVELOPE- CONFIGURATION A

	THICKNESS	GLOBAL WARMING POTENTIAL (GWP)	PRIMARY ENERGY NON RENEWABLE (PENR)
Stratigraphy	mm	Total Kg CO ₂ eq	Total MJ
Internal plaster (lime and plaster)	15	523,5	5292,3
Hollow bricks	300	8166,1	103242,4
Cement mortar	10	4845,3	19598,3
XPS thermal insulation panel with graphite	100	2082,1	64263,4
External plaster (lime and plaster)	15	523,5	5292,3
TOTAL		16140,5	197688,7

OPAQUE ENVELOPE- CONFIGURATION B

	THICKNESS	GLOBAL WARMING POTENTIAL (GWP)	PRIMARY ENERGY NON RENEWABLE (PENR)
Stratigraphy	mm	Total Kg CO ₂ eq	Total MJ
Internal plaster (lime and plaster)	15	523,5	5292,3
Hollow bricks	300	8166,1	103242,4
Cement mortar	10	4845,3	19598,3
XPS thermal insulation panel with graphite	140	2915,0	89969,3
External plaster (lime and plaster)	15	523,5	5292,3
TOTAL		16973,4	223394,6

WINDOW - TYPE A

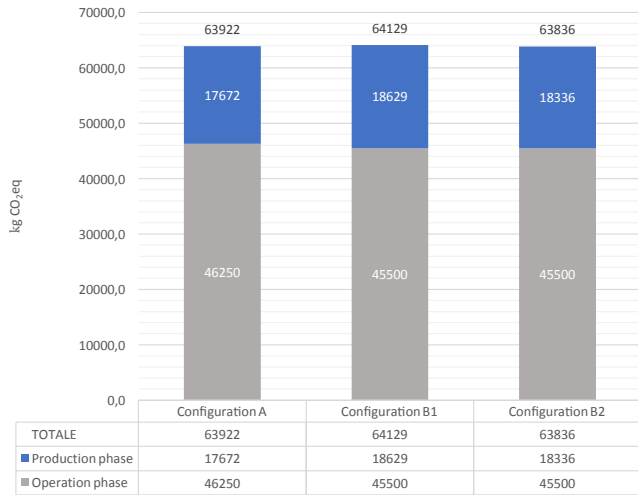
	THICKNESS/ UNIT	GLOBAL WARMING POTENTIAL (GWP)	PRIMARY ENERGY NON RENEWABLE (PENR)
COMPOSITION	mm	Total Kg CO ₂ eq	Total MJ
Aluminium frame	100	909,9	12259,0
Glazing surface	8	612,4	7066,6
Seals	3	5,9	120,1
Windows handle	n.1	1,22	22,46
Thermal break	20	2,5	52,0
TOTAL		1531,92	19520,16

WINDOW - TYPE B1

	THICKNESS/ UNIT	GLOBAL WARMING POTENTIAL (GWP)	PRIMARY ENERGY NON RENEWABLE (PENR)
COMPOSITION	mm	Total Kg CO ₂ eq	Total MJ
Aluminium frame	62	1003,6	12259,0
Glazing surface	12	587,3	7066,6
Seals	3	13,2	120,1
Windows handle	n.1	1,22	22,46
Thermal break	90	50,7	52,0
TOTAL		1656,02	19520,16

WINDOW - TYPE B2

	THICKNESS/ UNIT	GLOBAL WARMING POTENTIAL (GWP)	PRIMARY ENERGY NON RENEWABLE (PENR)
COMPOSITION	mm	Total Kg CO ₂ eq	Total MJ
Aluminium frame with recycled content	62	710,6	7711,8
Glazing surface	12	587,3	7066,6
Seals	3	13,2	120,1
Windows handle	n.1	1,22	22,46
Thermal break	90	50,7	52,0
TOTAL		1363,02	14972,96



gior misura sul bilancio prestazionale globale dell'edificio, e quella inglobata nei materiali che lo compongono.

La ricerca ha assunto come caso studio il modello di un piccolo edificio residenziale monofamiliare localizzato nel territorio ravennate, per il quale sono state previste due diverse configurazioni di involucro di crescente livello di resistenza termica, di cui sono stati determinati il fabbisogno energetico in esercizio e le relative emissioni di anidride carbonica (kgCO_2/m^2 anno). Successivamente è stato calcolato, adottando la banca dati tedesca Ökobaudat, l'impatto ambientale relativo al solo indicatore "potenziale di riscaldamento globale - GWP", nella fase 'from cradle to gate', sia nelle due diverse configurazioni oggetto di analisi energetica (A, B1), sia inserendo una terza variante (B2), costituita da un infisso di performance termica pari a B1 ma composto di circa il 51% di materiale riciclato.

Ciò ha consentito di stimare, per le tre differenti configurazioni, il GWP totale, rispettivamente per la fase di produzione e per quella di esercizio, permettendo di apprezzarne le variazioni in relazione al cambiamento della prestazione energetica e della impronta di carbonio incorporata.

the choice of materials and technological configurations;

The overall outcomes of the study can be located within current debate in the international academic field, emphasizing how the material composition of a component or constructive system, although restricted to the outer envelope of a building whose geometry and conformation limit its representativeness, can positively affect the overall energy and environmental balance of the building, even considering a single environmental impact indicator (GWP).

In order to obtain a global energy and environmental profile, future study developments, accordingly to LCA frameworks, could extend the analysis to other environmental impact indicators provided, moreover, by the Okobaudat dataset (such as Acidification, Eutrophication, etc).

ACKNOWLEDGMENTS

The authors wish to thank Fabio Soglia for providing essential data which made it possible to conduct this study.

L'indagine eseguita:

- conferma alcune evidenze già segnalate in letteratura (Ibn-Mohammed et al., 2013), sia in merito alla correlazione fra la riduzione dei consumi energetici dell'edificio in esercizio e l'aumento della quota di impatti incorporati nei materiali e nei componenti impiegati, sia rispetto al peso crescente che quest'ultima assume all'aumentare dello standard di efficienza energetica dell'edificio (Passer et al., 2012), azzerando il beneficio prodotto in fase operativa;
- evidenza come l'impiego di componenti che - a parità di prestazioni funzionali - incorporino quote di risorsa riciclata producano effetti sensibilmente positivi - ca. 18% di riduzione dell'impatto in kgCO_2eq - sulla dinamica osservata e quindi rappresentino un'efficace strategia per incentivare una più ampia disponibilità di componenti edilizi ottenuti adottando materie prime da riciclo;
- permette di formulare alcune considerazioni sull'utilizzo dell'approccio *Life Cycle* già nelle prime fasi progettuali, tanto per le nuove costruzioni, quanto per le ristrutturazioni, costituendo uno strumento sia di verifica e validazione del profilo ambientale dell'intero processo sia di indirizzo sulla scelta dei materiali e delle tecnologie.

Gli esiti complessivi dello studio si collocano nelle tematiche di attuale dibattito in ambito accademico internazionale, sottolineando, seppure limitatamente all'involucro esterno di un edificio, la cui geometria e conformazione ne limitano la rappresentatività casistica, e pur considerano un unico indicatore di impatto ambientale (GWP), come la composizione materica di un componente o sistema costruttivo possa giovare positivamente rispetto al bilancio energetico ambientale complessivo dell'edificio.

Al fine di ottenere un profilo energetico ambientale complessivo, sviluppi futuri del lavoro, in linea con gli indirizzi normativi di ambito LCA, potrebbero estendere l'analisi agli altri indicatori di impatto ambientale, peraltro già previsti dal dataset Ökobaudat (come per esempio Acidificazione, Eutrofizzazione, ecc).

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare Fabio Soglia per aver fornito dati indispensabili alla realizzazione di questo studio.

REFERENCES

- Anderson, J. and Thornback, J. (2012), "A guide to understanding the embodied impacts of construction products", *Construction Products Association*, No. 12, 2013.
- Asdrubali, F., Baldassarri, C. and Fthenakis, V. (2013), "Life cycle analysis in the construction sector: Guiding the optimization of conventional Italian buildings", *Energy and Buildings*, No. 64, pp. 73-89.
- Azari, R. (2014), "Integrated energy and environmental life cycle assessment of office building envelopes", *Energy and Buildings*, No. 82, pp. 156-162.
- Azari R. and Abbasabadi, N. (2018) "Embodied energy of buildings: A review of data, methods, challenges, and research trends", *Energy and Buildings*, No. 168, pp. 225-235.
- Chastas, P., Theodosiou, T., Bikas, D. and Kontoleon, K. (2017), "Embodied Energy and Nearly Zero Energy Buildings: A Review in Residential Buildings", *Procedia environmental sciences*, No. 38, pp. 554-561.
- Copiello, S. (2017), "Building energy efficiency: A research branch made of paradoxes", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No. 69, pp. 1064-1076.
- Din, A. and Brotas, L. (2016), "Exploration of life cycle data calculation: Lessons from a Passivhaus case study", *Energy and Buildings*, No. 118, pp. 82-92.
- D'Olimpio, D. (2017), "Innovative energy and environmental standards for architecture", *Techne Journal of Technology for Architecture and Environment*, No. 13, pp. 134-142.
- European Commission (2017), *Information for importers of equipment containing fluorinated greenhouse gases on their obligations under the EU F-gas Regulation*, Guidance for equipment importers.
- Ibn-Mohammed, T., Greenough, R., Taylor, S., Ozawa-Meida, L. and Acquaye, A. (2013), "Operational vs. embodied emissions in buildings - A review of current trends", *Energy and Buildings*, No. 66, pp. 232-245.
- Jia, J. and Crabtree, J. (2015), "You get what you ask for", in Jia, J. and Crabtree, J. (Eds.), *Driven by Demand: How Energy Gets its Power*, Cambridge University Press, Cambridge, MA, USA, pp. 3-10.
- Optis, M. and Wild, P. (2010), "Inadequate documentation in published life cycle energy reports on buildings", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, No. 15, pp. 644-651.
- Paleari, M., Lavagna, M. and Campioli, A. (2016), "The assessment of the relevance of building components and life phases for the environmental profile of nearly zero-energy buildings: life cycle assessment of a multifamily building in Italy", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, No. 21, Issue 12, pp. 1667-1690.
- Passer, A., Kreiner, H. and Maydl, P. (2012), "Assessment of the environmental performance of buildings: A critical evaluation of the influence of technical building equipment on residential buildings", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, No. 17, pp. 1116-1130.
- Pelsmakers, S. (2014), *The Environmental Design Pocketbook*, Riba Publishing, London, UK.
- Proietti, S., Sdringola, P., Desideri, U., Zepparelli, F., Masciarelli, F. and Castellani, F. (2013), "Life cycle assessment of a passive house in a seismic temperate zone", *Energy and Buildings*, No. 64, pp. 463-472.
- Sartori, I. and Hestnes, A.G. (2007), "Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article", *Energy and buildings*, No. 39, pp. 249-257.
- Stephan, A., Crawford, R.H. and De Myttenaere, K. (2013), "A comprehensive assessment of the life cycle energy demand of passive houses", *Applied energy*, No. 112, pp. 23-34.
- Verbeeck, G. and Hens, H. (2010), "Life cycle inventory of buildings: A contribution analysis", *Building and Environment*, No. 45, pp. 964-967.