

Impatti ambientali LCA del patrimonio residenziale europeo e scenari di prevenzione

RICERCA E
SPERIMENTAZIONE/
RESEARCH AND
EXPERIMENTATION

Monica Lavagna^a, Serenella Sala^b,

^aDipartimento di Architettura, ingegneria delle costruzioni e ambiente costruito, Politecnico di Milano, Italia

^bEuropean Commission, Joint Research Centre, Directorate D - Sustainable Resources, Bio-Economy Unit (D1), Italia

monica.lavagna@polimi.it

serenella.sala@ec.europa.eu

Abstract. La resilienza viene interpretata come la capacità di un sistema di far fronte agli impatti minimizzandone gli effetti (adattamento e mitigazione). In realtà, interventi a monte sulle cause, in termini di riduzione delle emissioni o uso più efficiente delle risorse, dovrebbero costituire la principale strategia d'azione per la riduzione degli impatti ambientali. L'articolo restituisce i risultati di una ricerca che si pone come obiettivo la quantificazione degli impatti ambientali medi associati all'attuale parco residenziale in Europa, tramite la costruzione di modelli rappresentativi su base statistica e l'applicazione del metodo Life Cycle Assessment. La conoscenza delle caratteristiche e delle prestazioni ambientali del patrimonio costruito, in particolare residenziale, è fondamentale per definire politiche efficaci e azioni prioritarie per la prevenzione degli impatti e l'incremento della resilienza.

Parole chiave: Life Cycle Assessment, edifici residenziali, Europa, LCA benchmark, modelli rappresentativi.

Contesto, obiettivi della ricerca e metodologia

Il rapporto tra resilienza e sostenibilità è alquanto controverso ed è possibile individuare in letteratura tre visioni possibili (Marchese et al., 2018): la resilienza come parte della sostenibilità, la sostenibilità come parte della resilienza, resilienza e sostenibilità come obiettivi separati. Il possibile elemento di convergenza tra resilienza e sostenibilità è costituito dall'obiettivo comune di garantire benefici alle persone e all'ambiente in condizioni normali ed estreme, seppur attraverso due approcci distinti.

Nella dimensione ambientale legata alle attività antropiche, la resilienza può essere interpretata come la capacità dell'umanità di far fronte agli eventi avversi, tra cui quelli determinati dagli impatti ambientali (es. scarsità delle risorse, inquinamento, cambiamenti climatici), minimizzandone gli effetti. Il rischio associato a questa specifica accezione è legato al fatto di focalizzare le attenzioni a valle sugli effetti (messa in sicurezza rispetto all'evento

catastrofico), come adattamento e mitigazione, e di ridurre gli interventi a monte sulle cause (riduzione degli impatti ambientali che causano gli eventi catastrofici), come azione preventiva fondamentale.

Per garantire una resilienza duratura, entrambe le prospettive devono essere tenute in considerazione, dando priorità a quelle azioni che cercano di ridurre gli impatti ambientali a monte e di ottimizzare l'uso delle risorse. In questo quadro, l'ambiente costruito costituisce uno degli ambiti di azione di maggiore significatività, dal momento che è il maggior responsabile di emissioni e di consumo di risorse. Per gestire le trasformazioni dell'ambiente costruito verso la sostenibilità e resilienza, il patrimonio edilizio deve essere visto come un bacino di risorse (*urban mining, building as material banks*), che devono essere conservate e rivalorizzate. Significa anche compiere delle osservazioni su tale patrimonio per comprendere dove sono le criticità rispetto all'aumento degli impatti e porvi rimedio, cercando di gerarchizzare le necessità di intervento in relazione alle priorità di azione finalizzate alla riduzione degli impatti, costruendo scenari che possano supportare le policy e le normative.

Riconoscendo il ruolo prioritario delle azioni di prevenzione per un incremento della resilienza del patrimonio edilizio, il presente articolo restituisce i risultati di una ricerca che si pone come obiettivo la quantificazione, tramite l'applicazione del metodo *Life Cycle Assessment (LCA)*, degli impatti ambientali medi associati all'attuale parco edilizio residenziale in Europa (che costituisce il 60% dell'intero patrimonio edilizio europeo). La metodologia LCA ha un ruolo strategico nell'identificare gli aspetti critici e i potenziali impatti dell'attuale situazione e nel supportare l'in-

LCA environmental impacts of Europe's housing stock and prevention scenarios

Abstract. Resilience is defined as the capacity of a system to cope with impacts by minimising their effects (through adaptation and mitigation). In practice, upstream measures on the causes, in terms of reducing the emissions or using resource more efficiently, should constitute the main action strategy for reducing the environmental impacts. The article describes the results of a research aiming at quantifying the average environmental impacts associated with the current housing stock in Europe through the construction of statistically-based representative models and the application of the Life Cycle Assessment (LCA) method. Knowledge of the characteristics and the environmental performances of the building stock – particularly the residential building stock – is of fundamental importance to establish effective policies and priority actions for the prevention of impacts and the strengthening of the resilience.

Keywords: Life Cycle Assessment, housing, Europe, LCA benchmark, representative models.

Context, objectives and methodology of the research

The relationship between resilience and sustainability is somewhat controversial and it is possible to identify three possible visions in literature (Marchese et al., 2018): (i) resilience as a component of sustainability, (ii) sustainability as a component of resilience, and (iii) resilience and sustainability as separate objectives. The possible element of convergence between resilience and sustainability is the common objective of guaranteeing benefits to people and the environment under normal and extreme conditions, albeit through two distinct approaches.

In the context of the environmental dimension linked to human activi-

ties, resilience can be interpreted as the capacity of humanity to cope with adverse events, including those caused by environmental impacts (e.g. due to resource scarcity, pollution or climate change), by minimising their effects. The risk associated with this specific definition of resilience is linked to the fact that it focuses attention downstream upon the effects (safeguarding against the catastrophic event), such as focusing on adaptation and mitigation, and it reduces the upstream focus, namely upon the causes (reducing the environmental impacts which cause the catastrophic events), as a fundamental preventive action.

For ensuring long lasting resilience, both perspectives should be considered, giving priorities to those preventive actions which are seeking to reduce upstream environmental impacts and to optimise the use of resources.

individuazione di azioni, politiche e strategie che aiutino a ridurre gli impatti ambientali, verificandone l'efficacia ambientale e considerando l'intero ciclo di vita e differenti indicatori ambientali. La ricerca preliminare a supporto del calcolo dello scenario base per la categoria abitativa, "Basket of products: housing"¹, è contenuta nel report "Indicators and targets for the reduction of the environmental impact of EU consumption" (EC-JRC, 2014). La ricerca è stata sviluppata dalla Commissione Europea Joint Research Centre (JRC) nell'ambito del progetto "Indicators and Assessment of the environmental impact of EU consumption (LC-IND2)", finanziato dalla direzione generale dell'Ambiente (DG ENV). Il JRC ha pubblicato nel 2017 i risultati completi corredati da valutazione di scenari di eco-innovazione (Baldassarri et al., 2017). Il progetto LC-IND2 è la continuazione ed evoluzione del progetto "Life cycle indicators for resources, products and waste. Basket-of-products" (EC-JRC, 2012a, b) volto a definire l'impatto ambientale medio di un cittadino europeo in relazione a tre categorie principali di consumo: alimentazione, mobilità, abitazione. Per costruire lo scenario di riferimento, per ogni settore sono stati raccolti dati statistici ed è stato individuato un 'paniere' di prodotti rappresentativi su cui effettuare la valutazione LCA, definendo l'impatto medio a essi associato. Viene dunque abbinato un approccio *top-down*, basato su dati statistici, con un approccio *bottom-up*, basato sulla valutazione LCA di singoli 'prodotti'. Lo scopo finale è di definire valori di riferimento della situazione attuale e targets di miglioramento.

In questo articolo sono presentati i risultati della ricerca relativa alla categoria di consumo *housing*, che si è articolata nei seguenti passaggi:

- analisi delle caratteristiche dell'attuale parco residenziale eu-

In this context, the built environment represents one of the most important area of action, as it is responsible for the greatest emissions and consumption of resources. For managing transformations of the built environment toward sustainability and resilience, the building stock should be seen as a supply of resources (urban mining and buildings as material banks) which must be conserved and given new value. It also means making observations regarding the building stock in order to understand where the critical issues lie in relation to increasing impacts and to remedy them by seeking to hierarchise interventions in relation to priorities for action geared towards reducing impacts by building scenarios that can support policies and legislation.

Acknowledging the leading role of prevention actions towards improved resilience of the building stock, this

article reports the results of a research which applies the life-cycle assessment method (LCA) in order to quantify the average environmental impacts associated with Europe's current residential building stock (which constitutes 60% of Europe's overall building stock). LCA plays a strategic role in identifying critical aspects and potential impacts of the current situation and in supporting the identification of actions, policies and strategies that can help reduce environmental impacts, verifying their environmental effectiveness and taking the entire life cycle and different environmental indicators into account. The preliminary research to calculate the base scenario for the residential category, "Basket of products: housing"¹, is contained in the report "Indicators and targets for the reduction of the environmental impact of EU consumption" (EC-JRC, 2014). The research was

developed by the European Commission Joint Research Centre (JRC) in the context of a project "Indicators and assessment of the environmental impact of EU consumption (LC-IND2)", funded by the Directorate-General for the Environment (DG ENV). In 2017 the JRC published the complete results, including an evaluation of eco-innovation scenarios (Baldassarri et al., 2017). The LC-IND2 is the continuation and development of the project entitled "Life cycle indicators for resources, products and waste. Basket-of-products" (EC-JRC, 2012a, b) designed to establish the average environmental impact of a European citizen in relation to three main consumption categories: food, mobility and housing. In order to define a baseline scenario, statistical data were gathered for each sector and a 'basket' of representative products on which to perform the LCA was chosen,

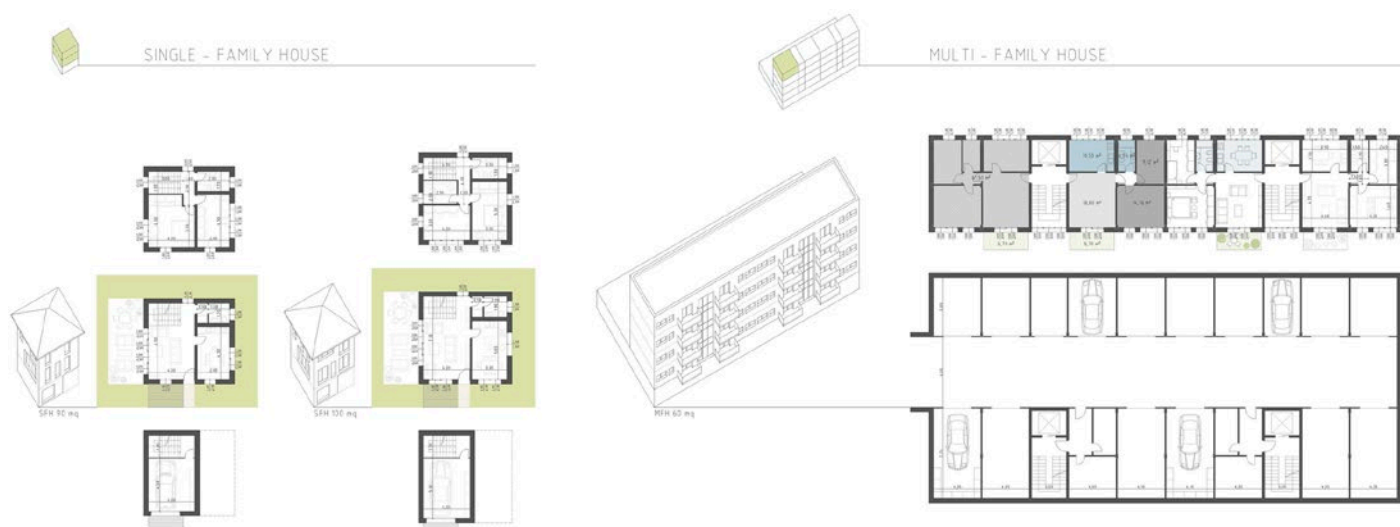
- individuazione delle criticità e priorità di intervento.
- suddivisione per cluster del patrimonio residenziale europeo (in base a tipologia, zona climatica, epoca di costruzione), definizione di modelli di riferimento rappresentativi di ciascun cluster e profilatura dettagliata delle caratteristiche tipologiche e costruttive di ciascun edificio rappresentativo, sulla base di dati statistici e a letteratura;
- calcolo dell'impatto ambientale LCA 'dalla culla alla tomba' dei diversi tipi rappresentativi di abitazione e *scale-up* per la valutazione degli impatti complessivi europei;
- definizione di valori LCA di riferimento (*benchmarks*) relativi all'impatto ambientale medio annuo di un alloggio europeo (questi dati sono stati espressi anche in termini di impatto medio annuo riferito a un cittadino europeo e a un metro quadrato di alloggio);

Al fine di definire gli impatti annuali pro capite di un cittadino medio europeo in relazione all'abitare, gli impatti complessivi legati al ciclo di vita (produzione, costruzione, uso, manutenzione e fine vita) dei diversi modelli rappresentativi di abitazione sono stati suddivisi per la vita utile (assunta di 100 anni). Gli impatti annuali di ciascuna tipologia di abitazione sono stati quindi moltiplicati per il numero totale di abitazioni (del rispettivo cluster), sommati tra loro (individuando gli impatti totali legati al patrimonio residenziale europeo) e divisi per la popolazione europea. La ricerca ha assunto come scenario d'indagine le nazioni appartenenti a EU-27, e come anno di riferimento il 2010.

developed by the European Commission Joint Research Centre (JRC) in the context of a project "Indicators and assessment of the environmental impact of EU consumption (LC-IND2)", funded by the Directorate-General for the Environment (DG ENV). In 2017 the JRC published the complete results, including an evaluation of eco-innovation scenarios (Baldassarri et al., 2017). The LC-IND2 is the continuation and development of the project entitled "Life cycle indicators for resources, products and waste. Basket-of-products" (EC-JRC, 2012a, b) designed to establish the average environmental impact of a European citizen in relation to three main consumption categories: food, mobility and housing. In order to define a baseline scenario, statistical data were gathered for each sector and a 'basket' of representative products on which to perform the LCA was chosen,

establishing the average impact associated with them. A top-down approach based on statistical data was thus combined with a bottom-up approach based on the LCA of individual 'products'. The ultimate purpose is to establish benchmark values for the current situation and targets for improvement. This article presents the results of the research into the housing consumption category, which was conducted in the following steps:

- analysis of the features of the current European housing stock through the gathering of statistics relating to size, type, period of construction, technical characteristics and energy consumption;
- cluster-based subdivision of the European residential building stock (according to type, climate zone, period of construction), establishment of representative benchmark



Definizione dei modelli rappresentativi sulla base dei dati statistici

Per definire i modelli rappresentativi, è stata condotta una dettagliata analisi dei dati statistici riferiti al patrimonio residenziale europeo², consultando diverse fonti. Oltre ai dati Eurostat, particolarmente utili sono stati gli esiti delle ricerche Intelligent Energy Europe (IEE): ENTRANZE, ODYSSEE, TABULA ed EPISCOPE. Queste fonti, basate sulla raccolta di dati statistici nazionali, hanno permesso di conoscere: quantità dello stock edilizio, periodo di costruzione, caratteristiche fisiche, consumi energetici. In particolare, la fonte più utile per la presente ricerca è stata il Data Hub elaborato dal Buildings Performance Institute Europe (BPIE). Per definire i modelli rappresentativi, sono state definite delle tipologie di 'prodotto' (abitazione), suddividendo l'attuale parco edilizio in cluster in base alla tipologia edilizia, al periodo di costruzione e alla zona climatica di appartenenza. Questa scelta è stata dettata dalla disponibilità di dati statistici relativi alle

quantità di abitazioni in relazione a ciascun cluster originato da questa scomposizione.

In base alla disponibilità di dati statistici, sono state individuate due tipologie di abitazione: unifamiliare e multifamiliare (alloggio in edificio multipiano). Poiché il 34.4% della popolazione europea vive in una casa isolata (Eurostat, 2014), questa tipologia è stata assunta come rappresentativa dell'abitazione unifamiliare. Per l'abitazione multifamiliare si è assunto l'edificio in linea di 3 piani con più di 10 appartamenti, considerandolo rappresentativo delle cortine edilizie urbane (Fig. 1).

Per quanto riguarda la zona climatica di appartenenza, l'Europa è stata suddivisa in tre fasce, in base ai gradi giorno (GG): zona climatica calda, 500-2300 GG (M, CY, P, GR, E, I); zona climatica moderata 2301-4000 GG (F, SLO, H, RO, BG, IRL, NL, B, L, GB, SK, D, A, CZ, PL, DK); zona climatica fredda, 4001-6000 GG (LT, LV, EW, S, FIN). Ogni nazione è stata associata a una di queste fasce, in relazione ai GG medi. Per quanto riguarda il periodo

models for each cluster and detailed profiling of the typological and construction characteristics of each representative building, based on statistical data and the scientific literature;

- calculation of the environmental impact from cradle to grave of the different representative types of dwelling using the LCA method and scaling up of the results in order to assess overall European environmental impacts;
- establishment of benchmark LCA values in relation to the average annual environmental impact of a European dwelling (these data have also been expressed in terms of the average annual impact of a European citizen and of one square metre of living space);
- identification of critical aspects and priorities for action.

In order to calculate the annual per-capita impacts of the average European

citizen in relation to housing, the overall impacts connected with the life cycle (production, construction, use, maintenance and end of life) of the various representative housing models were divided by their useful life (assumed to be 100 years). The annual impacts of each type of dwelling were then multiplied by the total number of dwellings (in the respective cluster), added to each other (thus giving total impacts connected with the European residential building stock) and divided by the European population. The research focused on 2010 as reference year and the EU-27 countries as survey scenario.

Development of representative models based on statistical data

To develop the representative models, a detailed analysis was performed on statistical data on the European housing stock², by consulting various sources.

In addition to Eurostat data, the results of research projects carried out by Intelligent Energy Europe (IEE), such as ENTRANZE, ODYSSEE, TABULA and EPISCOPE, were particularly useful. These sources, based on the collection of national statistical data, enabled an understanding of the quantity of the building stock, period of construction, physical characteristics and energy consumption. Specifically, the most useful resource for the research described here was the Data Hub created by the Buildings Performance Institute Europe (BPIE).

In order to develop representative models, it was necessary to define the typologies of 'product' (dwelling), by dividing the current building stock into clusters, according to building typology, period of construction and climate zone. This choice was dictated by the availability of statistical data regarding

the quantity of dwellings in relation to each cluster produced by this breakdown.

Based on the availability of statistical data, two typologies of dwelling were identified: single-family and multi-family (i.e. dwellings in multi-storey buildings). As 34.4% of the European population lives in a detached house (Eurostat, 2014), this type of building was taken as being representative of a single-family dwelling, while a linear three-storey building with more than 10 apartments was taken to be representative of urban buildings (Fig. 1).

With regard to climate zones, Europe has been divided into three areas according to the heating degree days (HDD): a warm climate zone, 500-2300 HDD (MT, CY, PT, GR, ES, IT), a moderate climate zone, 2301-4000 HDD (F, SLO, H, RO, BG, IRL, NL, B, L, GB, SK, DE, A, CZ, PL, DK) and a cold climate

di costruzione, sulla base della disponibilità di dati statistici e in relazione all'introduzione di innovazioni tecniche e normative (passaggio da vetro singolo a doppio vetro, spessore materiale isolante, passaggio da radiatori a pavimento radiante, ecc.), sono stati individuati quattro periodi: prima del 1945, 1945-1969, 1970-1989, 1990-2008.

Dalla combinazione di queste categorie sono stati definiti 24 cluster di abitazioni e per ognuno di questi è stato definito un modello rappresentativo², le cui caratteristiche differenziate riguardano: metratura dell'alloggio, numero di abitanti, altezza d'interpiano, metratura dell'interrato, volume riscaldato, rapporto S/V, rapporto muri-finestre (involucro), tecnologia costruttiva (fondazioni, struttura portante, solai, scale, chiusure verticali, finiture, finestre, copertura, solaio inferiore, partizioni interne), trasmittanze (chiusure verticali, copertura, solaio inferiore, serramenti), consumi energetici di riscaldamento, impianto di riscaldamento (generatore e terminali). La maggior parte delle informazioni è stata definita su base statistica. Per la definizione delle soluzioni costruttive (fondamentali per la valutazione LCA), ci si è riferiti agli esiti della ricerca TABULA, modificando le soluzioni in base ai valori di trasmittanza medi statistici individuati da BPIE. Per una completa descrizione e rappresentazione dei modelli, ci si è avvalsi di assunzioni in base alla letteratura.

Valutazione LCA dei modelli rappresentativi

La valutazione LCA è stata condotta in conformità alla norma EN 15978: 2011, organizzando i dati di inventario secondo la struttura modulare in fasi: produzione, costruzione, uso, fine vita. Per la costruzione dei dataset (che si riferiscono ai 24 modelli rappresentativi) e la valutazione

zone, 4001-6000 HDD (LT, LV, EE, SE, FIN). Each nation has been associated with one of these areas, in relation to average day degrees.

With regard to the period of construction, according to the availability of statistical data and in relation to the introduction of technical and legislative innovations (e.g. the transition from single to double glazing, thickness of insulation material, transition from radiators to underfloor heating, etc.), four periods were identified: pre-1945, 1945-1969, 1970-1989 and 1990-2008. By combining these categories, 24 clusters of dwellings were defined and for each one of them a representative model was drawn up², the differentiated characteristics of which regard: floor area of dwelling, number of occupants, inter-storey height, basement floor area, heated volume, surface-to-volume ratio, window-to-wall ratio (envelope),

construction technology (foundations, load-bearing structure, floors, staircases, building envelopes, finishing, windows, roof, lower floor, internal partitions), thermal transmittance values (building envelope, roof, lower floor, windows and doors), heating energy consumption, heating system (generator and terminals). Most of the information was defined on a statistical basis. To define construction solutions (which is essential for LCA), reference was made to the results of the TABULA research, modifying the solutions according to the average statistical transmittance values measured by the BPIE. For a complete description and representation of the models, use was made of assumptions based on the literature.

LCA of the representative models

LCA was conducted in accordance with the EN 15978: 2011 standard, organis-

LCA, è stato utilizzato il software SimaPro 8.3 e il database Ecoinvent 3.2. È stata adottata la metodologia di *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) ILCD at midpoint (EC-JRC, 2011). Per la fase di produzione, sono stati computati tutti i materiali confluenti nell'edificio, compresi i sanitari e gli impianti di climatizzazione, elettrici e idrici.

Per la fase di costruzione, sono stati calcolati gli impatti di trasporto, di assemblaggio e la produzione di rifiuti da costruzione, considerando anche gli impatti di produzione dei materiali che diventano rifiuti.

Per la fase d'uso, sono stati considerati i consumi di energia (riscaldamento, acqua calda sanitaria, raffrescamento, illuminazione, apparecchi elettrici) e di acqua; partendo dai dati statistici, è stata condotta una rielaborazione per definire consumi specifici in relazione ai diversi modelli. I consumi di energia sono quindi stati associati ai relativi vettori energetici (gas naturale, gasolio, legno, termovalorizzazione, carbone, energia elettrica), sempre sulla base di dati statistici, al fine di attribuire il relativo impatto ambientale. Ai valori concernenti la quantità di acqua consumata sono stati fatti corrispondere i medesimi valori di quantità di acque reflue da avviare a trattamento.

Sono inoltre stati considerati gli impatti di manutenzione e sostituzione durante la fase d'uso dell'edificio (considerando gli impatti di produzione e di trasporto dei nuovi componenti e di fine vita dei componenti rimossi). Gli intervalli di sostituzione sono stati assunti in base a valori tipici presenti in letteratura. Per la fase di fine vita, sono stati considerati gli impatti riguardanti il processo di dismissione dell'edificio, il trasporto al centro di trattamento e gli eventuali impatti di dismissione in discarica. Sono stati considerati anche gli impatti e i benefici associati alle attività di riciclaggio.

ing inventory data according to a modular structure into the following phases: production, construction, use and end of life. For the construction of the dataset (which refers to the 24 representative models) and the LCA, SimaPro 8.3 software and the Ecoinvent 3.2 database were used. The Life Cycle Impact Assessment (LCIA) ILCD at midpoint (EC-JRC, 2011) methodology was used. For the production phase, all materials used in the building were accounted for, including sanitary fixtures as well as heating/cooling, electrical and plumbing systems.

For the construction phase, the impacts of transport, assembly and production of construction waste were calculated, also taking the impacts of the production of materials that become waste into account.

For the use phase, energy consumption (heating, domestic hot water, cooling,

lighting and electrical appliances) and water consumption were considered; starting from the statistical data, the calculations were reworked in order to establish specific consumption figures for the different models. These energy consumption levels were then associated with the related energy carriers (natural gas, diesel, wood, waste-to-energy, coal and electricity), once again based on statistical data, in order to assign the respective environmental impact. The values for the quantity of water consumed were made to correspond to the same values for the quantity of wastewater to be disposed of for treatment. The impacts of maintenance and replacement during the building's use phase were also taken into account (considering the impacts of production and transportation of the new components and of the end of life of the components removed). Replacement inter-

Risultati della valutazione LCA

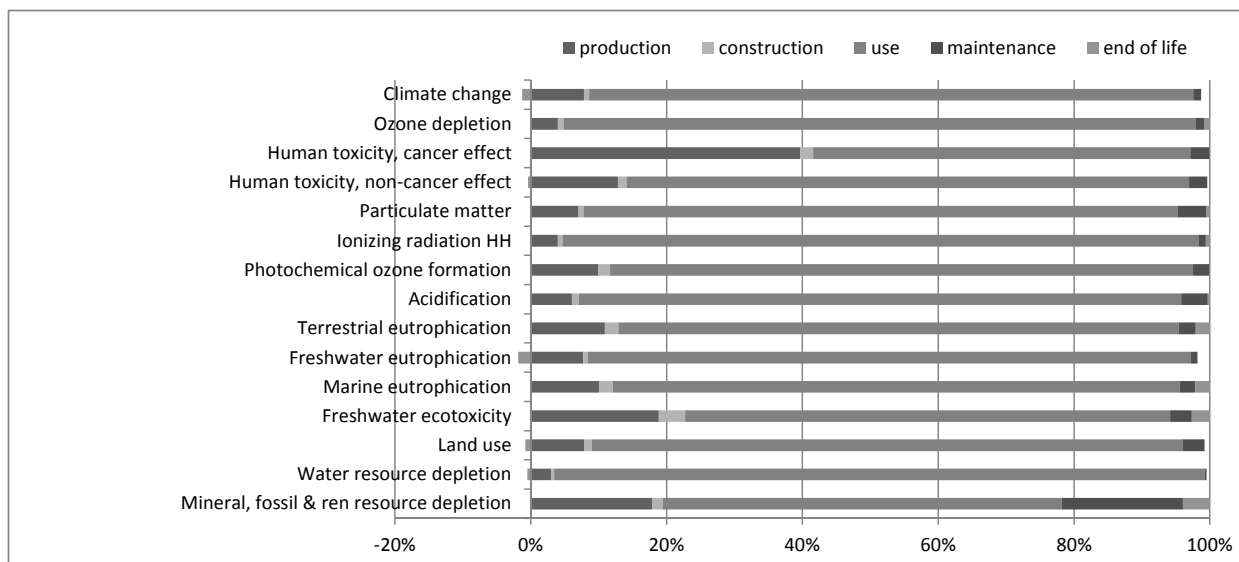
Considerando i risultati dell'impatto ambientale medio annuo riferiti al cittadino (Tab. 1; Fig. 2), la fase d'uso (consumi di energia e di acqua) è la fase a maggior impatto ambientale (56-97%, a seconda della categoria d'impatto; oltre l'80% degli impatti in 12 categorie d'impatto su 15), a causa degli elevati consumi di riscaldamento e di energia elettrica e dell'uso ancora elevato di fonti fossili per il riscaldamento e per la produzione di energia elettrica. La fase di produzione dei componenti edilizi è anch'essa una fase rilevante (3-40%, a seconda della categoria d'impatto), in particolare a causa della produzione di acciaio (armature calcestruzzo), piastrelle di ceramica, calcestruzzo e laterizio. Anche la fase di manutenzione ha un impatto non trascurabile (0.3-17.9%), in particolare sul consumo di risorse. La fase di fine vita ha un impatto limitato (-1.9-0.76%), come la fase di costruzione (0.5-3.9%).

Dalla *hotspot analysis*, realizzata per identificare le più importanti categorie di impatto per la categoria *housing*, tramite la normalizzazione dei risultati (Fig. 3), è emerso che le quattro categorie d'impatto più rilevanti sono: il consumo di acqua, dovuto in particolare all'acqua usata nella produzione di elettricità (se si escludesse l'acqua di raffreddamento delle centrali elettriche, che effettivamente non è un reale consumo, ma solo un uso e reimmissione in ambiente, questo impatto si ridurrebbe drasticamente); il consumo di risorse, dovuto in particolare alla produzione di piastrelle di ceramica e alla produzione di elettricità; la tossicità umana, dovuta in particolare alla produzione di acciaio per le armature (su questa categoria d'impatto ci sono ancora limitazioni rispetto all'affidabilità del metodo di caratterizzazione); e il particolato, emesso durante

la produzione di energia elettrica e l'uso di combustibili per il riscaldamento.

Un aspetto interessante emerso sia dall'analisi dei dati statistici sia dalle valutazioni LCA è il ruolo dell'unità di misura nella lettura dei fenomeni. Per esempio i dati d'impatto ambientale espressi ad alloggio rivelano come le abitazioni unifamiliari siano più impattanti delle abitazioni plurifamiliari, ma se il dato d'impatto ambientale viene espresso a metro quadrato di alloggio i risultati cambiano totalmente, poiché le abitazioni unifamiliari hanno una metratura maggiore e dunque gli impatti a metro quadrato risultano simili a quelli delle abitazioni plurifamiliari. Anche considerando l'impatto ambientale espresso ad abitante, le abitazioni unifamiliari risultano simili alle abitazioni plurifamiliari, dal momento che il numero di persone medio che alloggia in abitazioni unifamiliari è superiore a quello degli alloggi in edifici plurifamiliari. Questo evidenzia come sia opportuno che la presentazione dei risultati avvenga sempre utilizzando diversi tipi di unità di riferimento, al fine di evitare letture distorsive.

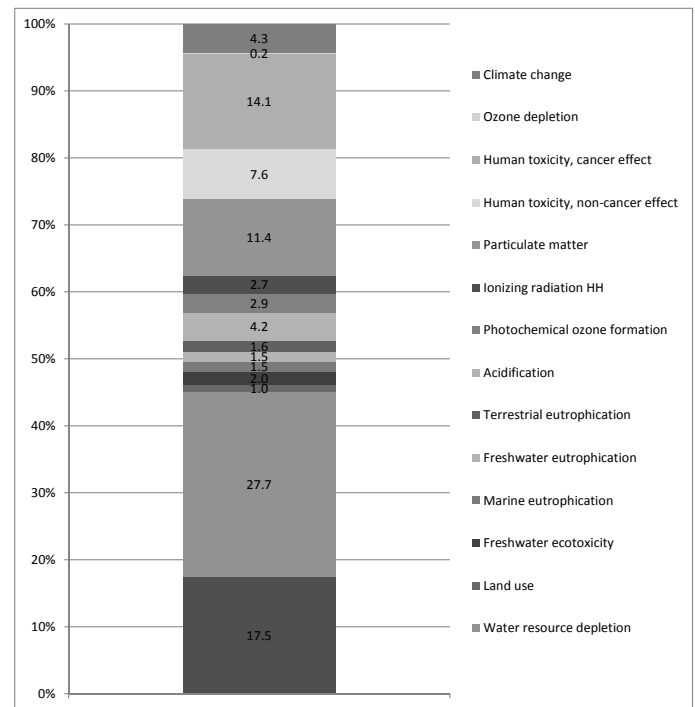
Leggendo i risultati, occorre sottolineare che non si riscontra, come ci si aspetterebbe, un significativo aumento degli impatti di produzione e costruzione nelle abitazioni costruite in epoca recente (nonostante il miglioramento delle prestazioni richieda un incremento di materiali utilizzati): questo è dovuto al fatto che le soluzioni costruttive ad alte prestazioni termiche tendono a un "alleggerimento" (sia in termini di peso, sia in termini di spessori) delle soluzioni di involucro, sia nella componente massiva (muratura) sia per l'uso di nuovi componenti leggeri (isolanti), riducendo di fatto gli impatti ambientali rispetto a soluzioni costruttive in muratura semipiena che usavano fino agli anni Sessanta. Si tratta però di soluzioni ancora molto distanti



Tab. 1 - Impatti ambientali LCA medi annuali (relativi all'anno 2010) riferiti a un cittadino di EU-27 e impatti annuali complessivi relativi alla categoria housing
LCA average annual environmental impacts (related to 2010) for an EU-27 citizen and total annual impacts in relation to the housing category

Impact category	Unit	Per person	Housing
Climate change	kg CO ₂ eq	2.62E+03	1.30E+12
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	3.33E-04	1.65E+05
Human toxicity, non-cancer effects	CTUh	2.70E-04	1.34E+05
Human toxicity, cancer effects	CTUh	3.48E-05	1.72E+04
Particulate matter	kg PM _{2.5} eq	2.90E+00	1.43E+09
Ionizing radiation, effects on human health (HH)	kBq U235 eq	2.05E+02	1.01E+11
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	6.11E+00	3.03E+09
Acidification	molc H+ eq	1.34E+01	6.65E+09
Terrestrial eutrophication	molc N eq	1.84E+01	9.13E+09
Freshwater eutrophication	kg P eq	1.48E-01	7.35E+07
Marine eutrophication	kg N eq	1.68E+00	8.31E+08
Freshwater ecotoxicity	CTUe	1.14E+03	5.64E+11
Land use	kg C deficit	4.84E+03	2.40E+12
Water resource depletion	m ³ water eq	1.51E+02	7.46E+10
Resource depletion	kg Sb eq	1.18E-01	5.84E+07

03 | Risultati della normalizzazione degli impatti medi annuali riferiti a un cittadino EU-27, ottenuti usando il metodo ILCD 1.08 (EC-JRC, 2010) e assumendo una pesatura uguale tra gli impatti
Results of the normalisation of average annual impacts for an EU-27 citizen obtained using the ILCD 1.08 method (EC-JRC, 2010) and assuming an equal weight among impacts



da quelle in uso attualmente: negli ultimi anni si sta assistendo a una controtendenza per cui gli spessori di isolamento e muratura vengono notevolmente enfatizzati per garantire valori di prestazione termica elevati, con un innalzamento degli impatti associati. Anche le dotazioni impiantistiche stanno esponenzialmente aumentando (es. impianti di produzione da fonti rinnovabili). Di conseguenza l'equilibrio tra vantaggi relativi alla riduzione dei consumi in fase d'uso e svantaggi relativi all'innalzamento degli impatti per la produzione dei materiali/impianti appare quanto

mai fondamentale per individuare le soluzioni efficaci dal punto di vista ambientale.

Occorre inoltre mettere in evidenza come i modelli rappresentativi, proprio perché sono rappresentativi e vengono definiti sulla base di caratteristiche "medie" e "diffuse", tendono a essere simili tra di loro e con caratteristiche "appiattite". Non danno dunque testimonianza della varietà di tipologie e tecnologie effettivamente presenti nell'intero patrimonio edilizio e non permettono dunque di cogliere i valori "minimi" e "massimi"

vals were assumed in accordance with typical values found in the literature. Finally, for the end-of-life phase, the impacts of the process of demolition/disposal of the building, transportation to the waste treatment centre and any impacts of landfill disposal were considered, as well as impacts and benefits associated with recycling operations.

LCA results

Considering the results of the average annual environmental impact per citizen (Table 1; Fig. 1), the use phase (energy and water consumption) is the phase with the greatest environmental impact (56-97%, depending on the impact category; over 80% of impacts in 12 categories out of 15), due to the high levels of consumption relating to heating and electricity and the still-high levels of use of fossil fuel sources for heating and electricity production.

The production phase of building components also contributes significantly (3-40%, depending on the impact category), particularly because of steel production (concrete reinforcement), ceramic tiles, concrete and bricks. The maintenance phase, too, has a not negligible impact (0.3-17.9%), particularly due to the consumption of resources. The end-of-life cycle has a limited impact (-1.9-0.76%), as does the construction phase (0.5-3.9%).

From a hotspot analysis carried out in order to identify the most significant impact categories for the housing category through normalisation of the results (Fig. 3), it was found that the four most significant impact categories are: i) water consumption, due in particular to water used in electricity production (if water used for cooling in power plants - which is not true consumption, as it is used and discharged

once again into the environment - were excluded, this impact would be drastically reduced); ii) the consumption of resources, due in particular to the production of ceramic tiles and of electricity; iii) human toxicity, due in particular to the production of steel for reinforcement (regarding this impact category limitations still apply with regard to the reliability of the characterisation method); and iv) impact due to particulates, emitted during electricity production and the use of fuels for heating.

An interesting aspect to emerge from both the analysis of the statistical data and from the life-cycle assessments is the role of the unit of measurement used to interpret the phenomena concerned. For example, environmental impact data expressed per dwelling show that single-family buildings have a greater impact than multi-family buildings. However, if the environmen-

tal impact data is expressed per square metre of floor space, the results changes totally, as single-family dwellings have a greater floor area, meaning that impacts per square metre are comparable to those of multi-family buildings. In addition, considering the environmental impact expressed per inhabitant, single-family dwellings are similar to multi-family buildings, as the average number of people that occupy single-family dwellings is higher than that for dwellings in multi-family buildings. This shows the importance of always presenting results using different types of unit in order to avoid distorted interpretations.

In examining the results, it should be pointed that a significant increase in the impacts due to production and construction of recent residential buildings, such as one might have expected, is not observed (despite the fact that improved

di impatto ambientale che all'interno del patrimonio sono presenti.

La fotografia che risulta dalla ricerca fa emergere che l'ambiente costruito è un patrimonio a elevata 'inerzia', dal momento che i tassi di rigenerazione si attestano attorno al 2% in Europa. Le direttive indirizzano gli interventi di nuova costruzione e riqualificazione verso obiettivi di sostenibilità, ma gli effetti si percepiscono con molta lentezza.

Applicazione dei modelli nella costruzione di scenari

Conoscere l'attuale impatto medio può consentire ai decisori istituzionali di simulare gli effetti di ricaduta ambientale di eventuali strategie di riqualificazione del patrimonio (interventi a favore dell'incremento della resilienza dell'ambiente costruito, rigenerazione versus demolizione e nuova costruzione, promozione di materiali *bio-based*, ecc.) e di individuare quelle più efficaci in termini di riduzione degli impatti ambientali complessivi (effetto serra e altro).

Per esempio, tra le criticità evidenziate dai risultati vi è l'incidenza della fase d'uso, in particolare correlata ai consumi energetici per il riscaldamento invernale. Questo aspetto è già oggetto delle politiche europee (Direttiva 2010/31/UE), ma l'applicazione dei modelli potrebbe consentire di verificare quali azioni sul patrimonio (quali livelli di isolamento termico, quali materiali, quali sistemi impiantistici) possono contribuire a una riduzione degli impatti senza generare *burden shift*, ossia spostamento degli impatti dalla fase d'uso alla fase di produzione, o tra una categoria di impatto e un'altra, come spesso avviene nelle *Passivhaus* e negli *Zero Energy Buildings*.

energy performance requires a greater quantity of materials to be used): this is due to the fact that high-performance thermal building solutions tend to "lightness" (in terms of both weight and thickness) solutions employed in the building envelope, for the "heavy" component (for example brick walls) as well as the use of new, lightweight components (insulation materials), thus reducing environmental impacts compared to those of building solutions with semi-solid brick walls which were used until the nineteen-sixties. The solutions in question, however, are still a long way from those currently in use: the last few years have seen a countertrend in which insulation and wall thicknesses are being significantly emphasised in order to guarantee high thermal performance values, with an increase in associated impacts. Building services, too (for example heat/electric-

ity production systems using renewable energy sources) are increasing exponentially. As a result, the balance between the advantages pertaining to a reduction in consumption during the use phase and the disadvantages pertaining to increased impacts due to the production of materials/systems would appear to be essential if effective solutions from the environmental perspective are to be identified.

It must also be emphasised that the representative models, precisely because they are representative and are defined on the basis of "average", "common" characteristics, tend to be similar to each other and with "flattened" characteristics. They thus fail to bear witness to the variety of typologies and technologies that are actually present in the entire building stock and hence do not allow the "minimum" and "maximum" environmental impact values which are

Tra le criticità è emerso anche la dipendenza dall'uso di fonti fossili per la produzione di energia. Anche su questo versante molte sono le politiche europee in atto, ma spesso non vi è una verifica degli impatti ambientali complessivi generati da una certa fonte energetica: per esempio i risultati della ricerca hanno evidenziato potenziali criticità ambientali legate all'uso di biomasse e termovalorizzazione, che sono invece ampiamente promosse in Europa.

Considerazioni conclusive

La valutazione degli impatti ambientali associati all'abitare in Europa costituisce un risultato interessante, poiché permette di leggere l'attuale condizione e di simulare scenari di eco-innovazione volti alla riduzione degli impatti e all'incremento della resilienza, e utili per la definizione di targets da inserire nelle politiche europee.

Il potenziale effetto di una politica o piano di azione europeo che voglia incidere sugli impatti ambientali del patrimonio residenziale europeo può essere valutato applicando gli scenari ai modelli presentati in questo articolo e utilizzando gli esiti di questa ricerca come base di riferimento, analizzando come i cambiamenti (per esempio nell'efficienza energetica degli edifici, nei vettori energetici utilizzati, nei materiali da costruzione utilizzati) possano influire sulla riduzione degli impatti complessivi.

In questo modo è possibile definire politiche di rigenerazione del patrimonio costruito orientate verso un'effettiva sostenibilità e resilienza. La più importante sfida per la sostenibilità dell'ambiente costruito è ottenere un patrimonio edilizio efficiente nell'uso delle risorse, aumentando la resilienza ed evitando *burden shifting*.

present within the building stock to be observed.

The picture that emerges from the research shows that the built environment is an asset characterised by a high degree of 'inertia', as regeneration rates are around 2% in Europe. Directives guide new construction activities and regeneration projects towards sustainability goals. However, the effects are felt extremely slowly.

Application of the models in building scenarios

Knowing the current average impact can enable institutional decision-makers to simulate the environmental effects of any building stock redevelopment strategies (interventions in favor of increasing the resilience of the built environment, regeneration as opposed to demolition and new building construction, promotion of bio-based ma-

terials, etc.) and identify the most effective ones in terms of reducing overall environmental impacts (for example the greenhouse and other effects).

For example, critical issues highlighted by the results include the relative impact of the use phase, particularly in connection with energy consumption for winter heating. This aspect is already the subject of European policies (Directive 2010/31/EU); however, application of the models might make it possible to assess what actions on the building stock (such as levels of thermal insulation, materials and technical building systems) can help to reduce impacts without leading to burden shift, that is, a shift in impacts from the use to the production phase, or from one impact category to another, as often happens in *Passivhaus* constructions and zero-energy buildings.

Another critical issue to emerge was

NOTE

1. La ricerca relativa allo sviluppo dei modelli abitativi di riferimento e al calcolo degli impatti ambientali a supporto del *Basket of Product: housing* è stata svolta da Monica Lavagna, con la collaborazione di Andrea Campioli, Serena Giorgi, Anna Dalla Valle, e con la supervisione del JRC, in particolare di Serenella Sala, Catia Baldassarri e Valentina Castellani.
2. Per una descrizione dettagliata dei dati statistici utilizzati come base di partenza della ricerca e una descrizione dettagliata dei modelli rappresentativi, si rimanda al libro *Abitare in Europa* (Lavagna et al., 2016).

REFERENCES

- Baldassarri, C., Allacker, K., Reale, F., Castellani, V. and Sala, S. (2017), *Consumer Footprint. Basket of Products indicator on Housing*, EUR 28765 EN Publications Office of the European Union, Luxembourg, BE, available at: <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/consumer-footprint-basket-products-indicator-housing> (accessed 15 February 2018).
- EC-JRC (2010), *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance*, Publications Office of the European Union, Luxembourg, BE, available at: <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-General-guide-for-LCA-DETAILED-GUIDANCE-12March2010-ISBN-fin-v1.0-EN.pdf> (accessed 2 April 2014).
- EC-JRC (2011), *Joint Research Centre ILCD Handbook - Recommendations based on existing environmental impact assessment models and factors for life cycle assessment in European context*, Publications Office of the European Union, Luxembourg, available at: http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC48157/ilcd_handbook-general_guide_for_lca-detailed_guidance_12march2010_isbn_fin.pdf (accessed 02/04/2014).
- EC-JRC (2012a), *Life cycle indicators for resources, products and waste. Framework*, European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, available at: <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/111111111/31346/1/lbna25466enn.pdf> (accessed 2 April 2014).

the dependence of energy production on fossil fuel sources. In this regard, too, many European policies are in place. However, often no assessment is made of the overall environmental impacts generated by a given energy source: for example, the results of the research have highlighted potentially critical environmental issues connected with the use of biomass and waste-to-energy, which are, in contrast, widely promoted in Europe.

Concluding remarks

Assessing the environmental impacts associated with residential buildings in Europe is a significant outcome, as it makes it possible to interpret current conditions and simulate eco-innovation scenarios, which aim to reduce impacts and to increase resilience, ultimately supporting the definition of targets to be included in European policies.

The potential effect of a European policy or plan of action designed to reduce the environmental impacts of Europe's residential building stock can be evaluated by applying the scenarios to the models presented in this article and using the results of this research as a basis for reference, analysing how changes (for example in the energy efficiency of buildings, in the energy carriers used, and in construction materials used) can influence the reduction of overall impacts.

By doing so it is possible to develop policies to regenerate the building stock geared towards effective sustainability and resilience. The main challenge for the sustainability of the built environment is achieving a resource efficient building stock while increasing its resilience and avoiding burden shifting.

EC-JRC (2012b), *Life cycle indicators for resources, products and waste. Basket-of-products*, European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, available at: <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/LC-indicators-Basket-of-products.pdf> (accessed 2 April 2014).

EC-JRC (2014), *Indicators and targets for the reduction of the environmental impact of EU consumption: Basket-of-products indicators and prototype targets for the reduction of environmental impact of EU consumption*, European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, available at: http://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/JRC92892_qms_h08_lcind_deliverable5_final_20141125.pdf (accessed 2 April 2014).

Eurostat (2014), *Housing statistics*, available at: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Housing_statistics (accessed 8 August 2014).

Lavagna, M., Giorgi, S. and Dalla Valle, A. (2016), *Abitare in Europa. Analisi dei dati statistici, definizione di modelli rappresentativi e valutazione ambientale LCA del patrimonio residenziale europeo*, Maggioli, Sant'Arcangelo di Romagna.

Marchese, D., Reynolds, E., Bates, M. E., Morgan, H., Spierre Clark, S. and Linkov, I. (2018), "Resilience and sustainability: Similarities and differences in environmental management applications", *Science of The Total Environment*, Vol. 613-614, pp. 1275-1283.

NOTES

1. The research concerning the development of the benchmark residential models and calculation of the respective environmental impacts for the *Basket of Product: housing* was conducted by Monica Lavagna, with the collaboration of Andrea Campioli, Serena Giorgi and Anna Dalla Valle, and with the supervision of the JRC, in particular by Serenella Sala, Catia Baldassarri and Valentina Castellani.

2. For a detailed description of the statistical data used as a starting base and a detailed description of the representative models, the reader is referred to the book entitled *Abitare in Europa* (Lavagna et al., 2016).