

Ambra Barbini¹, Giada Malacarne², Giovanna A. Massari¹, Dominik T. Matt^{2,3},

¹ Dipartimento di Ingegneria Civile Ambientale e Meccanica, Università degli Studi di Trento, Italia

² Fraunhofer Italia Research, Bolzano, Italia

³ Facoltà di Scienze e Tecnologie, Libera Università di Bolzano, Italia

ambra.barbini@unitn.it
giada.malacarne@fraunhofer.it
giovanna.massari@unitn.it
dominik.matt@unibz.it

Abstract. Il settore delle costruzioni, anche grazie all'implementazione digitale, può contribuire notevolmente al controllo e alla riduzione degli impatti ambientali di prodotti e componenti per l'edilizia. Questo articolo propone un flusso di lavoro aperto e inclusivo, per valutare la sostenibilità ambientale a partire da un *Building Information Model* in formato aperto IFC, integrato con dati sugli impatti ambientali. Semplificando la leggibilità dei dati e sfruttando il modello BIM per evidenziare punti di forza e criticità sul ciclo di vita di un serramento, è stata sviluppata un'applicazione software prototipo che punta a favorire non solo scelte consapevoli da parte della committenza, ma anche innovazioni sostenibili da parte dei produttori di materiali e componenti per l'edilizia.

Parole chiave: OpenBIM; IFC (Industry Foundation Classes); Sostenibilità ambientale; LCA (Life Cycle Assessment); ECI (Environmental Cost Indicator).

Introduzione

In Europa, in seguito alla direttiva CE/2014-24, recepita in Italia con il Nuovo Codice degli appalti (D.Lgs. 50/2016), l'intero settore delle costruzioni sta attraversando profondi cambiamenti, che puntano a garantire una gestione digitale e interdisciplinare del ciclo di vita degli interventi edilizi. In particolare, l'approccio metodologico del *Building Information Modeling* (BIM) prevede l'integrazione di dati geometrici e alfanumerici, relativi a diversi ambiti disciplinari.

Inoltre, per garantire lo scambio di dati tra tutti gli attori coinvolti nel ciclo di vita di un'opera, spesso è necessario fare riferimento a procedure open BIM che si basano sull'impiego di formati aperti non proprietari, come ad esempio l'*Industry Foundation Classes* (IFC), sviluppato da buildingSMART, per superare le barriere di interoperabilità legate all'impiego di diversi software di modellazione BIM.

Un *Building Information Model*, adeguatamente arricchito di informazioni e opportunamente visualizzato, può diventare

Environmental impacts visualization through open BIM procedures

Abstract. The construction sector, also thanks to digital implementation, can contribute significantly to the control and reduction of the environmental impacts of building products and components. This article presents an open and inclusive workflow to assess environmental sustainability starting from Building Information Modelling in IFC format integrated with data on environmental impacts. By simplifying the readability of the data and exploiting the BIM model to highlight strengths and weaknesses in the life cycle of a window, a prototype software application has been developed, aiming to encourage not only conscious choices by clients but also sustainable innovations by manufacturers of building materials and components.

Keywords: Open BIM; IFC; Environmental sustainability; LCA (Life Cycle Assessment); ECI (Environmental Cost Indicator).

uno strumento funzionale ad evidenziare informazioni tecniche complesse (Loeh, 2021), la cui accessibilità e trasparenza risulta di fondamentale importanza, come nel caso delle informazioni sugli impatti ambientali di specifiche soluzioni tecnologiche o di diverse fasi del ciclo di vita di un edificio o dei suoi componenti. Attualmente il settore delle costruzioni svolge un ruolo chiave nella riduzione del consumo di risorse non rinnovabili e della produzione di emissioni inquinanti. Le pubbliche amministrazioni sono sempre più sensibili sia ai temi della gestione digitale dei progetti (Plazza, 2019), anche tramite procedure open BIM, che a quelli della sostenibilità ambientale (Barbini, 2020). Inoltre, l'attenzione per gli impatti ambientali di un intervento edilizio da parte delle pubbliche amministrazioni, in qualità di committenti, può innescare processi virtuosi lungo tutta la catena di fornitura (Kreiner, 2018).

Questo articolo propone un flusso di lavoro aperto e inclusivo per evidenziare i dati sugli impatti ambientali, tramite oggetti BIM in formato aperto IFC, puntando ad implementare l'accessibilità alle informazioni legate alla sostenibilità ambientale.

Contesto

Il crescente livello di digitalizzazione del settore delle costruzioni offre ampie opportunità anche nell'ambito della sostenibilità ambientale, supportando lo sviluppo di analisi e simulazioni dedicate al controllo dei consumi di risorse non rinnovabili e delle emissioni inquinanti (Röck, 2018). Uno degli aspetti su cui molte ricerche si concentrano riguarda la scelta di materiali e prodotti (Carvalho, 2021).

Introduction

In Europe, in accordance with Directive EC/2014-24, and transposed/implemented in Italy with the new procurement code (Legislative Decree 50/2016), the entire construction sector is facing important changes, which aim to ensure a digital and interdisciplinary management of the life cycle of building interventions. In particular, the Building Information Modelling (BIM) methodology requires the integration of geometric and alphanumeric data related to different disciplinary domains.

Moreover, to ensure the exchange of data between all the actors involved in the life cycle of a project, it is often necessary to refer to open BIM procedures, which are based on the use of non-proprietary open formats, such as the standard Industry Foundation Classes (IFC). This standard has been

developed by buildingSMART to overcome interoperability barriers related to the use of different BIM authoring software.

A Building Information Model, properly enriched and appropriately visualised, can become a functional tool to highlight complex technical information (Loeh, 2021), whose accessibility and transparency is crucial, as in the case of information on the environmental impacts of specific technological solutions or different phases of the life cycle of a building or its components.

Indeed, the construction sector currently plays a key role in reducing the consumption of non-renewable resources and the production of polluting emissions. Public administrations are increasingly sensitive to both the issues of digital project management (Plazza, 2019), also through open BIM

Tab. 01 | Categorie di impatto ambientale e relative unità di misura secondo il metodo LCA
Environmental impact categories and related units of measurement according to the LCA method

Categorie di impatto	Unità di misura
ADE - Abiotic Depletion Elements	kg Sb eq - (kg of eq. Antimonio)
ADFF - Abiotic Depletion Fossil Fuel	MJ (Mega Joule)
GWP - Global Warming Potential	kg CO ₂ eq - (kg of equivalent Carbon Dioxide)
ODP - Ozone Depletion Potential	kg CFC-11 eq - (kg of eq. Trichlorofluoromethane)
HT - Human Toxicity (cancer effect)	CTUh - (comparative toxic units for humans)
HT - Human Toxicity (non-cancer effect)	CTUh - (comparative toxic units for humans)
FWAE - Fresh Water Abiotic Ecotoxicity	CTUe - (comparative toxic units for ecosystems)
MAE - Marine Abiotic Ecotoxicity	kg 1,4-DB eq - (kg of eq. 1,4-Dichlorobenzene)
TE - Terrestrial Ecotoxicity	kg 1,4-DB eq - (kg of eq. 1,4-Dichlorobenzene)
PO - Photochemical Ozon	kg C ₂ H ₄ eq - (kg of equivalent Etheene)
AP - Acidification Potential	kg SO ₂ eq - (kg of equivalent Sulfur dioxide)
EP - Eutrophication Potential	kg PO ₄ ³ eq - (kg of equivalent Phosphate)

Tab. 01

01 | Fattori di conversione per calcolare l'ECI secondo il sistema olandese, Determination Method. Environmental performances table 5 pag. 40
Conversion factors for calculating the ECI according to the Dutch system, Method of determination. Environmental performance table 5 pag. 40

Oltre ad essere promossa dai protocolli di certificazione, la scelta di materiali e prodotti con impatti ambientali contenuti, consente l'applicazione al singolo prodotto di specifiche etichette e dichiarazioni ambientali. Tra le dichiarazioni più diffuse troviamo l'*Environmental Product Declaration* (EPD), che attesta informazioni verificabili sull'impatto ambientale del ciclo di vita di un prodotto.

Le informazioni contenute in un'EPD si basano sul *Life Cycle Assessment* (LCA), un metodo che considera tutti i flussi di materiali ed energia assorbiti e rilasciati nelle diverse fasi del ciclo di vita di un prodotto o servizio, per valutarne gli impatti ambientali¹. Il risultato di un LCA è un insieme di valori che corrispondono a diverse categorie di impatti ambientali, espressi in unità di misura fittizie e diverse per ogni categoria (Tab. 1). Mentre le etichette e le dichiarazioni ambientali mirano a certificare le prestazioni ambientali di un prodotto e si rivolgono quindi principalmente ad un potenziale acquirente, sono più rari gli strumenti che consentono ai produttori di comprendere e interpretare i dati ambientali sui loro prodotti. Alcuni strumenti in questa direzione sono stati resi disponibili dalla compagnia olandese Echochain, che supporta le imprese di diversi settori nel calcolare l'impronta ambientale di propri prodotti e processi. Uno strumento analogo è stato sviluppato in Belgio dall'agenzia pubblica dei rifiuti delle Fiandre (OVAM), che ha reso disponibile TOTEM (*Tool to Optimize the Total Environmental impact of Materials*) per valutare l'impatto ambientale di materiali da costruzione sulla base del metodo LCA, con l'intento di stimolare e incoraggiare lo sviluppo di soluzioni ecocompatibili. Alcuni paesi europei, tra cui i Paesi Bassi, hanno inoltre adottato a livello nazionale un sistema per definire un indicatore

Environmental impact category	Equivalent unit	Weighting factor [€ / kg equivalent]
Depletion of abiotic raw materials (excluding fossil energy carriers) - ADP	Sb eq	€0.16
Depletion of fossil fuels - ADP	Sb eq ⁹	€0.16
Climate change - GWP 100 y.	CO ₂ eq	€0.05
Ozone layer depletion - ODP	CFC-11 eq	€30
Photochemical oxidation - POCP	C ₂ H ₄ eq	€2
Acidification - AP	SO ₂ eq	€4
Eutrophication - EP	PO ₄ eq	€9
Human toxicity - HTP	1,4-DCB eq	€0.09
Freshwater aquatic ecotoxicity - FAETP	1,4-DCB eq	€0.03
Marine aquatic ecotoxicity - MAETP	1,4-DCB eq	€0.0001
Terrestrial ecotoxicity - TETP	1,4-DCB eq	€0.06

01

di costo ambientale (ECI) di componenti edilizi e materiali da costruzione, calcolato tramite dei fattori di conversione che uniformano l'unità di misura delle diverse categorie di impatto ambientale e rendono confrontabili e sommabili gli impatti in un unico valore espresso in euro. L'ECI non indica una spesa effettiva, ma un'approssimazione dei costi che dovrebbero essere sostenuti per evitare gli effetti negativi dei singoli impatti ambientali. Nei Paesi Bassi, il Ministero per le infrastrutture e per la gestione delle acque (Rijkswaterstaat) ha scelto di utilizzare l'ECI, espresso con l'acronimo MKI (Milieu Kosten Indicator) come criterio di qualità nelle gare d'appalto: le offerte con un valore MKI più basso ottengono un punteggio migliore. I fattori di conversione (Fig. 1) sono resi disponibili tramite il

procedures, and environmental sustainability (Barbini, 2020). The attention to the environmental impacts of a construction intervention by public administrations, as clients, can trigger virtuous processes throughout the supply chain (Kreiner, 2018). This article proposes an open and inclusive workflow to highlight data on environmental impacts, using BIM objects in IFC format, aimed at implementing the accessibility of information related to environmental sustainability.

State of the art

The increasing level of digitisation in the construction sector also offers a wide range of opportunities in the area of environmental sustainability, supporting the development of analyses and simulations dedicated to controlling the consumption of non-renewa-

ble resources and polluting emissions (Röck, 2018). One of the aspects that many studies focus on is the selection of materials and products (Carvalho, 2021), which involves different actors in the construction supply chain. The selection of materials and products with low environmental impact, as well as being promoted by certification protocols, allows specific labels and environmental declarations. The most common environmental declarations include the Environmental Product Declaration (EPD), a declaration that provides objective information on the environmental impact of a product's life cycle. The information contained in an EPD is based on a Life Cycle Assessment (LCA), a method that considers all materials and energy flows absorbed and released at different stages of the life cycle of a product or service to as-

sess its environmental impacts¹. The result of an LCA is a set of values corresponding to different categories of environmental impacts, expressed in different fictitious units of measurement for each category (Tab. 1). While environmental labels and declarations aim to clarify the environmental performance of a product and are primarily targeted for potential purchasers, tools allowing manufacturers to have more control over the environmental data related to their products are less common. In this regard, the Dutch company Echochain has developed some tools, which support companies from different sectors in calculating the environmental footprint of their products and processes. In Belgium, the Public Waste Agency of Flanders (OVAM) has developed a similar tool (TOTEM - Tool to Optimise the Total Environmental impact

of Materials) to assess the environmental impact of construction materials based on the LCA method, with the intention of stimulating and encouraging the development of environmentally friendly solutions. In addition, some European countries, including the Netherlands, have adopted a system at national level to define an environmental cost indicator (ECI) for building components and construction materials, calculated by means of conversion factors that standardise the unit of measurement of the different environmental impact categories, making them comparable and summable in a single value expressed in euros. The ECI does not indicate actual expenditure but a projection of the costs that should be sustained to avoid the negative effects of environmental impacts. In the Netherlands, the Ministry of Infrastructure

database nazionale per l'ambiente (Nationale MilieuDATABASE, NMD).

Per quanto riguarda il settore delle costruzioni, diverse ricerche hanno esaminato la possibilità di collegare le potenzialità dei nuovi strumenti digitali e i metodi per il calcolo degli impatti ambientali, come dimostrano i vari tentativi di integrazione BIM-LCA (Obrecht, 2020), principalmente con l'obiettivo di guidare le scelte progettuali, confrontando diverse soluzioni alternative. Dai vari tentativi di integrazione BIM-LCA, che raramente considerano punti di vista diversi da quello del progettista, emerge l'importanza di una comunicazione chiara e trasparente dei risultati attraverso opportune visualizzazioni, accessibili e comprensibili per tutti gli attori coinvolti (Chong, 2017).

Sulla scia delle recenti trasformazioni del settore delle costruzioni, anche i produttori di componenti per l'edilizia sono sempre più coinvolti nell'implementazione digitale e sostenibile di prodotti e processi, sia per adeguarsi alle normative vigenti sia per risultare più competitivi sul mercato. La digitalizzazione in ottica BIM richiede ai produttori di sviluppare librerie di oggetti BIM, ovvero cataloghi digitali rappresentativi dei prodotti reali. Gli oggetti BIM restituiscono, in formato digitale, sia le informazioni geometriche del prodotto che le sue caratteristiche prestazionali, tradizionalmente descritte nelle schede tecniche di prodotto. Dal momento che lo sviluppo di una libreria di oggetti BIM richiede competenze nuove e software specifici e costosi, i produttori generalmente esternalizzano questo processo, ma possono comunque accedere alla libreria in formato aperto tramite appositi software gratuiti abilitati alla sola visualizzazione. Allo stesso tempo, la maggiore attenzione per

and Water Management (Rijkswaterstaat) decided to adopt the ECI, expressed by the acronym MKI (Milieu Kosten Indicator) as a quality criterion in tenders: offers with a lower MKI obtain a higher score. The conversion factors (Fig. 1) are made available via the national environmental database (Nationale MilieuDATABASE, NMD). Several studies examined the possibility of linking new digital tools with methods for calculating environmental impacts, as demonstrated by various attempts at BIM-LCA integration (Obrecht, 2020), mainly with the aim of guiding design decisions, as well as the evaluation of offers by comparing different alternative solutions. From the various attempts at BIM-LCA integration, which rarely consider points of view other than that of the designer, emerges the importance of the clear and transparent communication of

results through appropriate visualisations, accessible and understandable for all actors involved (Chong, 2017). Recent innovations in the construction sector also have an impact on building component manufacturers. They are increasingly involved in the digital and sustainable implementation of products and processes, both to comply with regulations and to be more competitive on the market. The BIM-based digital transformation requires manufacturers to develop libraries of BIM objects, i.e., digital catalogues representing real products. In digital format, BIM objects provide, both the geometric information of the product and its performance characteristics, traditionally described in product data sheets. Since the development of a library of BIM objects requires new skills and specific, expensive software, manufacturers generally outsource

la sostenibilità ambientale spinge i produttori di componenti per l'edilizia anche a richiedere valutazioni della sostenibilità ambientale dei propri prodotti, principalmente con il metodo LCA, i cui risultati risultano complessi da comprendere e interpretare.

Per questo motivo, è qui proposto un flusso di lavoro, risultante in un applicativo software prototipo, che supporta il produttore nel meglio comprendere i risultati di un'analisi LCA rendendoli fruibili tramite apposite visualizzazioni di oggetti BIM disponibili in formato IFC, ovvero accessibili gratuitamente senza la necessità di nuove competenze.

L'obiettivo del flusso di lavoro è quello di: a) comunicare visivamente il livello di sostenibilità del prodotto, nelle varie fasi del suo ciclo di vita; b) identificarne sia i punti di forza che le criticità; c) selezionare gli ambiti di innovazione necessari per rendere il prodotto più sostenibile.

In particolare, questo articolo descrive il flusso di lavoro applicato al calcolo e al confronto dell'ECI, come definito nel Rijkswaterstaat olandese, per ognuna delle quattro fasi del ciclo di vita.

Strumenti e metodi

Il Caso studio

Il flusso di lavoro per il calcolo e il confronto dell'ECI, proposto in questo contributo, è stato testato tramite un caso studio relativo ad un serramento in legno di cui sono state analizzate quattro fasi del ciclo di vita: produzione, installazione, manutenzione e dismissione. I dati di un oggetto BIM, rappresentativo del serramento, sono stati integrati con i dati sugli impatti ambientali del serramento per calcolare l'ECI ed è stato utilizzato un codice di colori per di-

this process but can still access the library in open format through free, view-only software. At the same time, the increased focus on environmental sustainability also drives building component manufacturers to request analyses to assess the environmental impacts of their products, mainly using the LCA method, the results of which are complex to understand and interpret.

For this reason, a workflow is proposed here, resulting in a prototype software application, which supports the manufacturer to better understand the results of an LCA analysis by making them usable through special visualisations of BIM objects available in IFC format, freely accessible without the need for new expertise.

The objective of the workflow is to: a) visually communicate the level of sustainability of the product at the vari-

ous stages of its life cycle; b) identify both its strengths and weaknesses; c) select the areas of innovation needed to make the product more sustainable. This article describes the workflow applied to the calculation and comparison of the ECI, as defined in the Dutch Rijkswaterstaat, resulting from each of the four life cycle stages.

Methods and tools

The case study

This article proposes a workflow, tested in a case study, related to the calculation and comparison of the ECI of the four phases of the life cycle – namely the production, installation, maintenance and decommissioning – of a wooden window. The calculation and comparison of the ECI is done by integrating the data of the BIM object, representative of the window, with the

stinguere se ciascuna delle quattro fasi considerate presenta un valore alto, medio o basso dell'ECI. Per rendere l'applicazione sperimentata agevolmente replicabile e accessibile, sono stati utilizzati solo file in formato aperto interoperabile.

La predisposizione degli oggetti BIM

Innanzitutto, è stato sviluppato l'oggetto BIM del serramento, ovvero la sua copia virtuale, che deriva dallo sviluppo di una libreria di oggetti BIM² per una falegnameria della Provincia di Trento (Italia). Di tale prodotto sono stati sviluppati quattro oggetti BIM, ciascuno rappresentativo di una specifica fase del ciclo di vita. Dal punto di vista geometrico i quattro serramenti hanno le stesse caratteristiche, mentre da un punto di vista informativo presentano parametri e valori diversi, relativi alle dimensioni o alla stima di quantità, funzionali al calcolo dell'ECI di ogni fase considerata, come ad esempio i metri cubi di legno e vetro necessari per la produzione del serramento o il numero di chiodi necessario per l'installazione (Fig. 2). I quattro oggetti

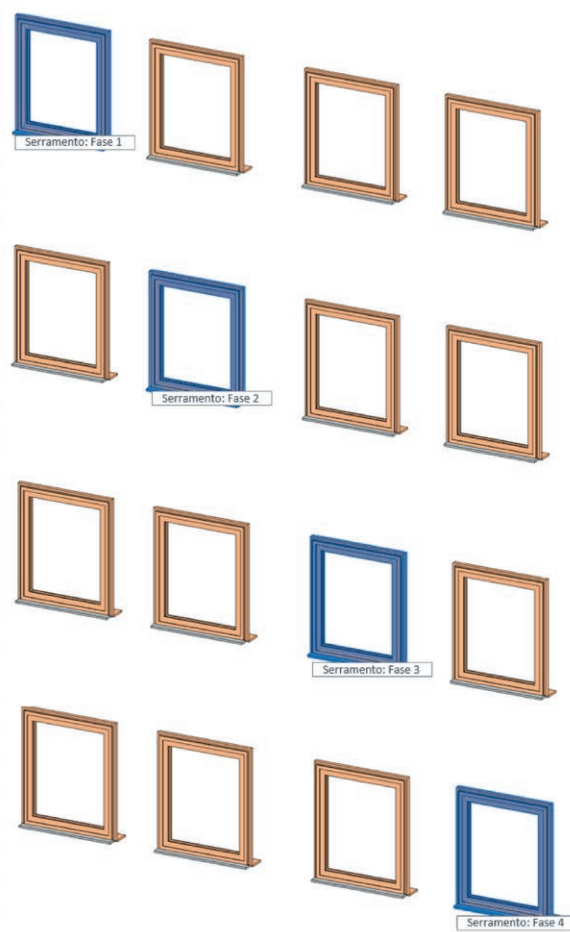
BIM sono tutti contenuti all'interno dello stesso file, in formato IFC.

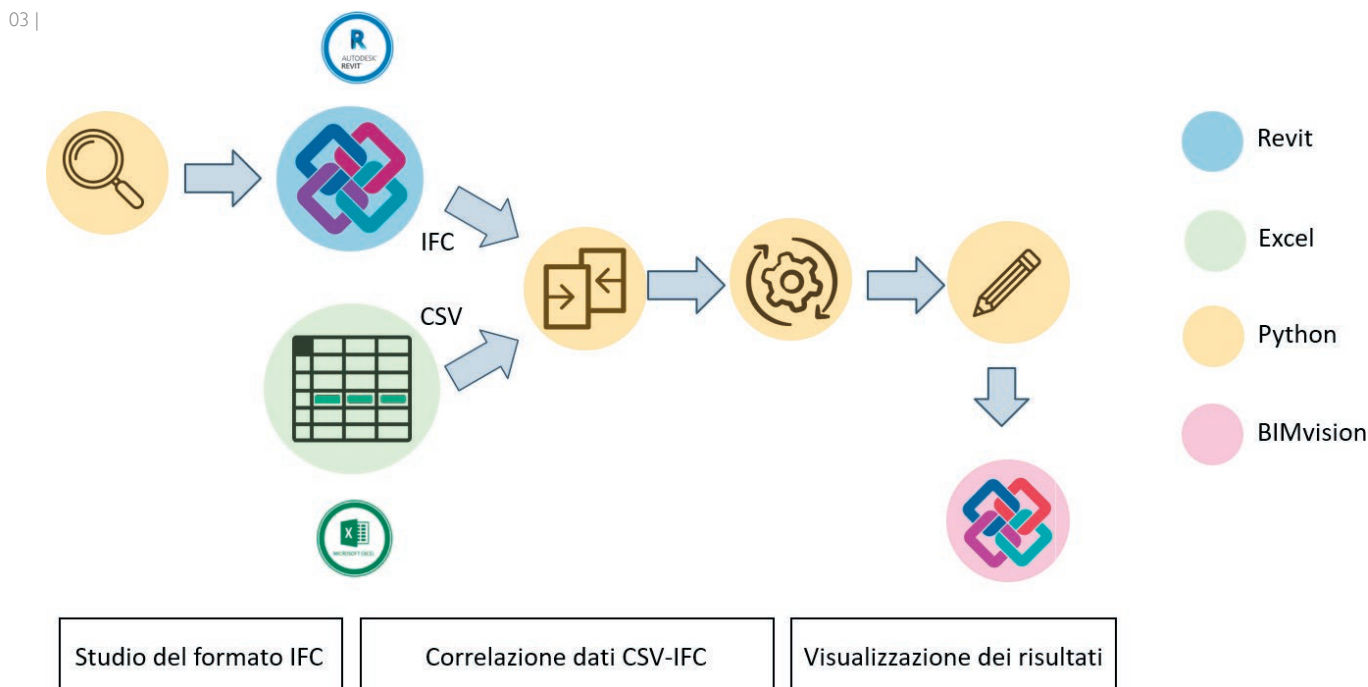
La raccolta dei dati ambientali

I dati sugli impatti ambientali del serramento sono stati raccolti in un foglio di calcolo salvato in formato CSV, in modo tale da risultare accessibili e visualizzabili tramite diversi strumenti anche gratuitamente. I dati sono stati divisi in base alle quattro fasi considerate e corrispondono ai risultati di analisi LCA condotte su materiali e componenti quanto più simili possibile a quelli dell'oggetto scelto per il caso studio. Per la fase di produzione, ad esempio, sono stati raccolti i risultati di LCA relativi alla produzione di legno e vetro analoghi a quelli impiegati per la produzione del serramento. Questi dati sono stati selezionati da appositi database e forniti dal laboratorio di analisi EcarnRicert. All'interno dello stesso foglio di calcolo sono stati inseriti anche i fattori di conversione, per calcolare l'ECI.

Serramento Fase 1		Serramento Fase 2	
km stabilimento_cantiere		km stabilimento_cantiere	100.000000
Legno_volume	0.056	Legno_volume	0.056
Legno_tonnellate	0.028	Legno_tonnellate	0.028
N chiodi		N chiodi	7.000000
km acquisizione_stabilimento	10.000000	km acquisizione_stabilimento	
Silicone_kg		Silicone_kg	1.700000
km installazione_impianto fv		km installazione_impianto fv	
Ottone_kg	0.500000	Ottone_kg	
Vetro_kg	28.398	Vetro_kg	
Guarnizione_kg	2.710	Guarnizione_kg	
% legno riciclato	30.000000	% legno riciclato	
% legno certificato	70.000000	% legno certificato	

Serramento Fase 3		Serramento Fase 4	
km stabilimento_cantiere		km stabilimento_cantiere	
Legno_volume	0.056	Legno_volume	0.056
Legno_tonnellate	0.028	Legno_tonnellate	0.028
N chiodi	7.000000	N chiodi	7.000000
km acquisizione_stabilimento		km acquisizione_stabilimento	
Silicone_kg	1.700000	Silicone_kg	1.700000
km installazione_impianto fv		km installazione_impianto fv	200.000000
Ottone_kg	0.500000	Ottone_kg	
Vetro_kg	28.398	Vetro_kg	
Guarnizione_kg	2.710	Guarnizione_kg	
% legno riciclato		% legno riciclato	
% legno certificato		% legno certificato	





Il flusso di lavoro

Il flusso di lavoro (Fig. 3) è stato caratterizzato da tre fasi principali: lo studio del modo in cui le informazioni vengono archiviate all'interno del file IFC, la correlazione tra i dati archiviati in formato IFC e CSV per il calcolo dell'ECI, e infine la visualizzazione dei risultati, aggiornando il file IFC e variando i colori del modello geometrico. Sia il calcolo dell'ECI, che la colorazione, sono stati inizialmente testati modificando manualmente il file IFC aperto come file di testo, e solo successivamente automatizzati tramite lo sviluppo di codici con il linguaggio di programmazione Python.

data on the environmental impacts of the window and by using a colour code to distinguish if each of the four phases considered has a high, medium or low value of the ECI to make the tested application easily replicable and accessible.

Preparation of the BIM model

First of all, the BIM object of the wooden window, its virtual copy, was developed. The virtual copy of the window comes from the development of a BIM object library² for a wood manufacturer in the Province of Trento (Italy). Four BIM objects of this product were developed, each representing a specific phase of its life cycle. From a geometric point of view, the four windows have the same characteristics, while from an informative point of view, they have different parameters and values, related to dimensions or estimated

quantities (such as the cubic metres of wood and glass needed to produce the window or the number of nails needed for the installation), used to calculate the ECI of each phase of the life cycle, (Fig. 2). The four BIM objects are all contained within the same file in IFC format.

Collecting environmental data on windows with similar characteristics

The data on the environmental impacts of the windows were collected in a spreadsheet saved in CSV format, in order to be accessible and viewable through different tools and free of charge. The data was divided according to the four phases considered and corresponds to the results of LCA analyses carried out on materials and components as similar as possible to those of the window selected as the case study. The production phase, for

Studio del formato IFC

Una fase preliminare allo sviluppo della sperimentazione ha riguardato lo studio del formato IFC e di come i dati vengono gerarchicamente strutturati al suo interno. In particolare, è stato fondamentale comprendere come vengono associati i dati informativi ai vari elementi del modello geometrico. In questa fase, oltre alla consultazione dei materiali disponibili sul sito di BuildingSmart³ sono state analizzate le informazioni contenute all'interno del file IFC del caso di studio, aprendolo sia come documento di testo che tramite un visualizzatore gratuito di IFC⁴.

example, considers LCA results of the production of wood and glass similar to those used for the production of the wooden window. These data were selected from special databases and provided by the EcamRicert analysis laboratory. The same spreadsheet also included conversion factors to calculate the ECI.

The workflow

The workflow (Fig. 3) followed the following three main steps: the study of how the information is stored within the IFC file, the correlation between the data stored in IFC and CSV format for the calculation of the ECI and finally the visualisation of the results, updating the IFC file and varying the colours of the geometric model. Both the calculation of the ECI and the colouring were initially tested by manually editing the IFC file, opened as a

text file, and only later automated by code development with the Python programming language.

Study of the IFC format

A preliminary phase in the development of the experiment focused on studying the IFC format and how the data is hierarchically structured within it. It was essential to understand how data are associated with the various components of the geometric model. For the accomplishment of this step, guidelines available on the BuildingSmart website³ were consulted and the information contained within the IFC file was directly analysed by opening it as a text document or using an IFC viewer⁴.

Calculation of the ECI

Within this step, the data stored in IFC and CSV format were linked to each

Calcolo dell'ECI

In questa fase i dati archiviati in formati diversi, nello specifico IFC e CSV, sono stati messi in correlazione per eseguire operazioni algebriche di moltiplicazione e addizione, volte a calcolare l'ECI di ogni fase considerata del ciclo di vita del serramento (Fig. 4). In particolare, moltiplicando le quantità presenti nel modello BIM con i dati raccolti nel foglio di calcolo, sono stati dapprima calcolati gli impatti ambientali di ogni contributo. Per contributi si intendono tutti i prodotti e i processi considerati per il calcolo degli impatti di ogni fase. Ad esempio, per la fase di produzione, sono stati considerati i contributi di legno e vetro. Quindi, le quantità di legno e vetro presenti nell'oggetto BIM rappresentativo del serramento sono state moltiplicate per i rispettivi valori degli impatti unitari salvati nel foglio di calcolo. Dalla somma degli impatti ambientali dei vari contributi della stessa fase sono stati ottenuti gli impatti ambientali di ogni fase. Questi ultimi sono stati quindi moltiplicati per i fattori di conversione proposti dal sistema olandese, per ottenere l'ECI di ogni fase considerata.

Per automatizzare il calcolo dell'ECI è stato sviluppato un codice in Python per la lettura dei file IFC e CSV e per individuare e mettere in correlazione rispettivamente i valori relativi alle

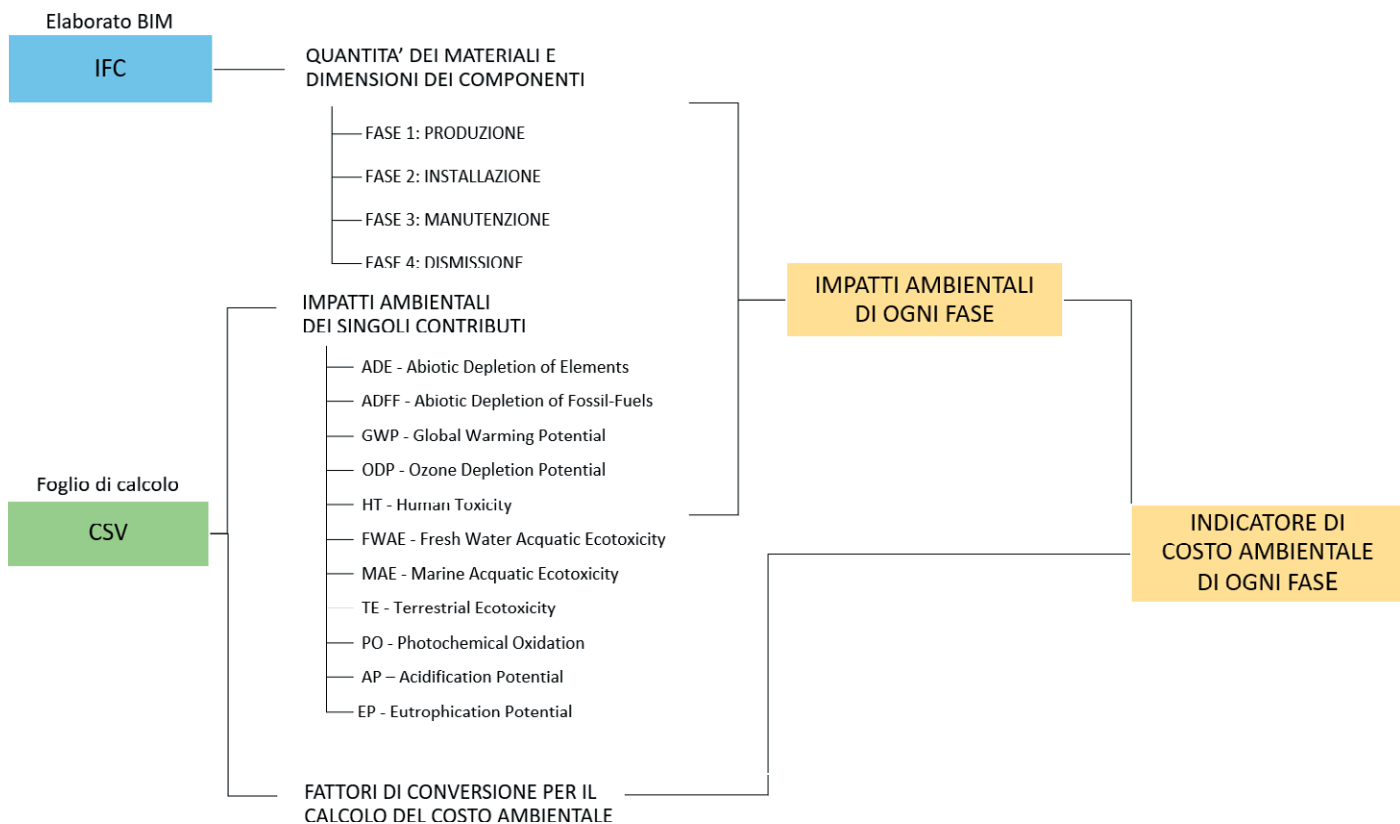
quantità dei materiali o alle dimensioni dei componenti e gli impatti dei singoli contributi considerati per le quattro fasi del ciclo di vita del serramento oggetto di analisi.

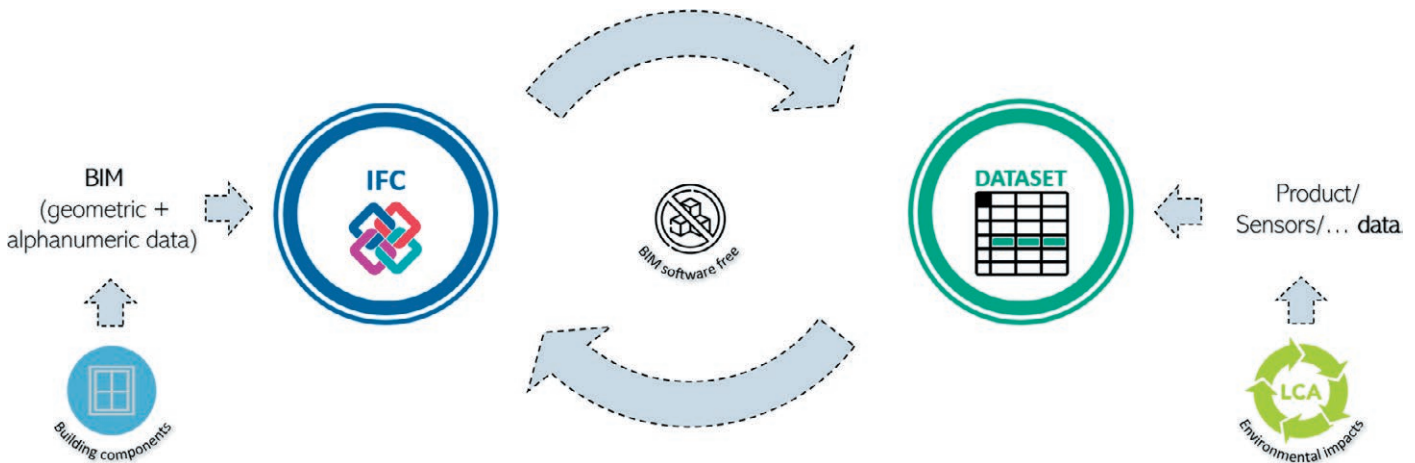
Visualizzazione dei risultati

Il valore dell'ECI di ciascuna fase considerata è stato associato al modello geometrico corrispondente, aggiornando il valore di un parametro dedicato a questa informazione e precedentemente predisposto in fase di sviluppo dell'oggetto BIM.

Per rendere gli indicatori di costo ambientale visivamente confrontabili indipendentemente dalle differenze più o meno ampie tra i loro valori, è stata applicata una normalizzazione in scala logaritmica, in modo tale da poter definire più agevolmente gli intervalli di valori per le diverse colorazioni: per i valori dell'ECI minori di 3 è previsto che il modello geometrico venga visualizzato in verde, per valori compresi tra 3 e 7 in giallo e maggiori di 7 in rosso, per evidenziare un valore dell'ECI, rispettivamente basso, medio o elevato.

Dopo aver impostato anche queste istruzioni nel codice Python è stato verificato l'effettivo cambio di colore, aprendo il file IFC aggiornato tramite il visualizzatore gratuito.





Risultati

Il risultato della sperimentazione è un'applicazione software prototipo che consente di calcolare e confrontare l'ECI di quattro fasi del ciclo di vita di un serramento, partendo da un oggetto BIM in formato IFC e da un set di dati raccolti e organizzati all'interno di un file in formato CSV, collegati tra loro e completamente indipendenti da qualsiasi piattaforma di BIM *authoring* (Fig. 5). Il file IFC contiene dati geometrici ed alfanumerici di partenza, mentre il file CSV contiene i dati relativi agli impatti ambientali.

Visualizzazione dei risultati

Studiando il file in formato IFC e leggendolo come un documento di testo, si è osservato come le informazioni modellate in ambiente BIM vengono archiviate all'interno di una struttura gerarchica composta da stringhe di testo, ognuna delle quali è contraddistinta da un codice numerico usato per legare tra loro le informazioni. Ad ogni oggetto BIM sono associate delle stringhe che ne descrivono sia i parametri informativi e i rispettivi valori, sia la geometria che lo contraddistingue.

other to perform algebraic operations of multiplication and addition, aimed at calculating the ECI of each phase of the window's life cycle (Fig. 4). In particular, by multiplying the quantities provided by the BIM model with the data collected in the spreadsheet, the environmental impacts of each contribution were first calculated. By contributions we mean all products and processes considered for the calculation of the impacts of each phase. For example, for the production phase, the contributions of wood and glass were considered. Then, the quantities of wood and glass provided by the BIM object of the window were multiplied by the respective values of the impact's units saved in the spreadsheet. From the sum of the environmental impacts of the various contributions of the same phase, the environmental impacts of each phase were obtained.

These were then multiplied by the conversion factors proposed by the Dutch system to obtain the ECI for each stage considered.

To automate the calculation of the environmental cost, a Python code was developed to read the IFC and CSV files and to identify and correlate values for material quantities or component sizes and the impacts of the individual contributions, considering the four phases of the life cycle of the window frame under analysis.

Results visualisation

The value of the ECI for each phase of the window's life cycle was associated with the related geometric model, updating the value of a parameter dedicated to this information and previously prepared during the development of the BIM object.

To make the ECIs visually comparable

Nel caso di studio, gli oggetti BIM sono quattro ognuno rappresentativo di una diversa fase del ciclo di vita del serramento. Nel file IFC originale, alle geometrie dei telai è stato associato lo stesso materiale, denominato "LegnoDiAbete", e modificandone il codice RGB i quattro telai si colorano tutti dello stesso colore. Per poter attribuire un diverso colore, in base al valore dell'ECI risultante, sono quindi stati creati tre nuovi materiali (in modo che nel file IFC sia presente un materiale per ciascuna fase del ciclo di vita del serramento), i cui codici RGB consentono di ottenere i colori scelti per evidenziare l'ECI alto, medio o basso, rispettivamente: rosso, giallo e verde.

Calcolo dell'indicatore del costo ambientale

I risultati relativi al calcolo dell'indicatore del costo ambientale (Tab. 2) possono essere raggruppati in due macrogruppi: i valori degli impatti ambientali e il valore dell'ECI, calcolati per ogni fase del ciclo di vita del serramento. Per gli impatti ambientali si hanno undici valori, corrispondenti alle undici categorie di impatto previste dal metodo LCA seguito, mentre nel caso

regardless of the differences between their values, a normalisation on a logarithmic scale has been applied. In this way, it is easier to define value ranges for the different colours: for ECI values of less than 3, the geometric model would be displayed in green, for values between 3 and 7 in yellow and greater than 7 in red, in order to highlight a low, medium or high ECI value respectively.

After setting these instructions in the Python code, the actual colour change was verified by opening the updated IFC file in a free IFC viewer.

Results

The result of the research is a prototype software application to calculate and compare the ECI of four phases of the life cycle of a wooden window, starting from a BIM object in IFC format and from a set of data collected and organ-

ised within a CSV file, linked together and completely independent of any BIM authoring platform (Fig. 5). The IFC file contains geometric and alphanumeric data, while the CSV file contains data on environmental impacts.

Visualisation of results

Studying the file in IFC format and reading it as a text document, it has been observed that the information modelled in the BIM environment is stored within a hierarchical structure composed of text strings, each of which is distinguished by a numerical code used to link the information to each other. Strings are associated with each BIM object, describing both its information parameters and their respective values and the geometry that distinguishes it.

In the case of this study, there are four BIM objects, each representing a dif-

Tab. 02 | Risultati degli impatti ambientali e dell'ECI per ogni fase
Environmental impacts and ECI results for each phase of the wooden window's life cycle

06 | A sinistra: visualizzazione tramite il visualizzatore di IFC degli oggetti BIM originali (in alto) e in seguito al confronto cromatico (in basso); A destra: visualizzazione della scheda dei parametri con il valore del "Costo ambientale" aggiornato
On the left: Visualisation through the IFC viewer of the original BIM objects (top) and after colour comparison (bottom); On the right: visualisation of the parameters with the updated "Environmental cost" value

	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	
Categorie di impatto ambientale	ADE [kg Sb eq]	3.97E-04	5.53E-04	3.35E-04	3.55E-07
	ADFF [MJ]	2.79E+03	5.41E+02	2.39E+03	8.95E-01
	GWP [kg CO ₂ eq]	2.88E+06	5.45E+01	6.41E+01	4.63E-01
	ODP [kg CFC-11 eq]	8.81E-06	1.69E-05	1.43E-05	4.13E-09
	HT [kg 1,4-DB eq]	8.57E+04	3.53E+00	8.32E+01	4.92E-02
	FWAE [kg 1,4-DB eq]	6.04E+05	3.47E+01	1.40E+01	1.12E-02
	MAE [kg 1,4-DB eq]	7.32E+04	2.77E+05	4.76E+04	9.58E+01
	TE [kg 1,4-DB eq]	5.41E-02	3.69E-02	2.79E-02	2.90E-05
	PO [kg C ₂ H ₄ eq]	4.13E-02	1.46E-02	2.83E-02	1.60E-04
	AP [kg SO ₂ eq]	1.97E+06	2.95E-01	3.63E-01	3.59E-03
	EP [kg PO ₄ ³ eq]	1.19E-01	9.47E-02	7.66E-02	7.83E-04
ECI [€]	8034291.78	120.34	399.90	0.20	

| Tab. 02

dell'ECI si ha un unico risultato per ogni fase. Il valore dell'indicatore del costo ambientale così calcolato è automaticamente integrato all'interno dell'oggetto BIM, tramite l'applicazione software prototipo.

Confronto delle quattro fasi del ciclo di vita del prodotto sulla base dell'ECI

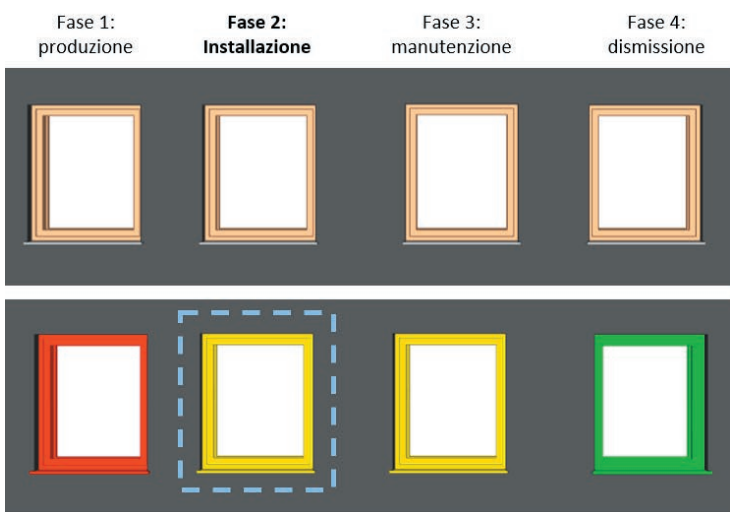
Aperto il file BIM, aggiornato con i valori dell'indicatore del costo ambientale calcolati per ciascuna fase del ciclo di vita del prodotto, tramite un qualsiasi visualizzatore di file IFC, i modelli geometrici rappresentativi delle quattro fasi del ciclo di vita considerate risultano colorati secondo i criteri precedentemente illustrati e selezionandone uno alla volta è possibile leg-

gere il valore dell'ECI che è stato calcolato ed associato ad ogni fase (Fig. 6).

Discussione e conclusioni

Data la difficoltà di lettura e interpretazione dei risultati LCA, il flusso di lavoro presentato in questo contributo propone una soluzione che consente di visualizzare graficamente il livello di sostenibilità di un prodotto, confrontando diverse fasi del suo ciclo di vita.

Le piattaforme di BIM *authoring* consentono l'associazione di svariate informazioni ai singoli elementi del modello geometrico. Tuttavia, spesso la creazione e la compilazione di appositi parametri possono rivelarsi dispendiose in termini di tempo e



Proprietà	Posizione	Classificazione	Relazioni
Nome			
Valore			
U.m.			
Element Specific			
Guid	2jpXRORoL1Ve4YdSThopCv		
IfcEntity	IfcWindow		
Name	Finestra in legno:fase 2:240172		
ObjectType	Finestra in legno		
OverallHeight	1 790,2		mm
OverallWidth	1 310		mm
Tag	240172		
Abaco delle finestre			
Altezza	1 480		mm
Costo	30		
Costo ambientale	120,34		
Famiglia	Finestra in legno: fase 2		
Larghezza	1 230		mm
Tipo	Finestra in legno: fase 2		

| 06

rallentare eccessivamente la fase di modellazione e/o progettazione, non risultando quindi compatibili con gli attuali flussi di lavoro. Si è quindi proposto di partire da un modello BIM in formato IFC da utilizzare sia come riferimento geometrico-quantitativo, che per la visualizzazione dei risultati.

Per poter comprendere rapidamente la struttura dati del formato IFC si è rivelato fondamentale fare riferimento ad un caso studio semplificato, quale quello del calcolo dell'indicatore del costo ambientale nelle diverse fasi del ciclo di vita di un serramento, che ha agevolato i vari test svolti per comprendere come gestire correttamente i dati geometrici e alfanumerici salvati nel file IFC.

Inoltre, data l'elevata complessità e variabilità dei metodi LCA, si è scelto di fare riferimento proprio al calcolo dell'ECI secondo il metodo della monetizzazione delle prestazioni ambientali, in quanto permette di lavorare con unità di misura uniformi e quindi con risultati dai valori facilmente confrontabili. La comunicazione dei risultati tramite un unico valore e l'utilizzo del formato aperto, inoltre, garantiscono una maggiore accessibilità ai dati sulla sostenibilità ambientale, offrendo l'opportunità ai produttori di componenti per l'edilizia di promuovere o innovare i loro prodotti, minimizzandone gli impatti ambientali e a progettisti, imprese edili e committenti di prediligere soluzioni che ottimizzino la sostenibilità ambientale ed economica. La sperimentazione ha mostrato le potenzialità offerte dal collegamento tra modelli BIM in formato aperto IFC e dati integrativi per il confronto degli impatti ambientali nelle diverse fasi del ciclo di vita di un componente edilizio. Il caso studio qui descritto non è però sufficiente per rendere generalmente valido il flusso di lavoro proposto. In futuro, il flusso di lavoro

ferent phase of the window's life cycle. In the original IFC file, the geometries of the frames are associated with the same material, called "LegnoDiAbete", and by modifying the RGB code of this material, the four frames are all coloured the same. In order to be able to associate a different colour with each phase of the life cycle according to the value of the resulting ECI, three new materials have been created (so that in the IFC file, there is a material for each phase of the window's life cycle), whose RGB codes allow us to obtain the colours selected to highlight a high, medium or low ECI, respectively: red, yellow and green.

Calculation of the ECI

The results related to the calculation of the ECI (Tab. 2) can be grouped in two macro-groups: the values of the environmental impacts and the value

of the ECI, calculated for each phase of the window's life cycle. For the environmental impacts there are eleven values, corresponding to the eleven impact categories foreseen by the LCA method, while in the case of the ECI, there is only one result for each phase. The value of the ECI calculated is therefore automatically integrated into the BIM object via the prototype software application.

Comparison of the ECI in the four phases of the product life cycle

When opening the BIM file updated with the values of the ECI calculated for each phase of the product life cycle, using any IFC file viewer, the geometric models representing the four phases of the life cycle are coloured according to the criteria illustrated above and, selecting one at a time, it is possible to read the value of the ECI that has been

potrà essere applicato, testato e validato ad altre componenti per l'edilizia fino ad arrivare alla scala dell'intero edificio e dell'infrastruttura, per analizzarne e meglio comprenderne le prestazioni ambientali.

NOTE

¹ UNI 14040:2006.

² Creata con Autodesk Revit 2020.

³ Sito web di Building Smart, standard IFC, available at: <https://www.buildingsmartitalia.org/standard/standard-bs/industry-foundation-classes-ifc/>.

⁴ Strumento gratuito: BIMvision.

REFERENCES

Barbini, A., Malacarne, G. and Matt, D. (2020), OpenBIM per le Pubbliche Amministrazioni. Uso del dato interoperabile ed approccio open nei processi informativi delle costruzioni.

Barbini, A., Malacarne, G., Romagnoli, K., Massari, G.A. and Matt, D.T. (2020), "Integration of life cycle data in a BIM object library to support green and digital public procurements", *International Journal of Sustainable Development and Planning*, Vol. 15, n. 7, pp. 983-990.

Carvalho, J.P., Villaschi, F.S. and Bragança, L. (2021), "Assessing Life Cycle Environmental and Economic Impacts of Building Construction Solutions with BIM", *Sustainability*, Vol. 13, n. 16, 8914.

Chong, H.Y., Lee, C.Y. and Wang, X. (2017), "A mixed review of the adoption of Building Information Modelling (BIM) for sustainability", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 142, 4114-4126.

Foundation for Building Quality (2017), "Determination Method. Environmental performance. Buildings and civil engineering works", available at: <https://milieudatabase.nl/wp-content/uploads/2020/02/05-Determination-Method-v3.0-JAN2019-EN.pdf#:~:text=The%20Environmental%20>

calculated and associated with each phase (Fig. 6).

Discussion and conclusion

Given the difficulty of reading and interpreting LCA results, the workflow presented in this paper proposes a solution that allows the level of sustainability of a product to be visualised graphically, comparing different phases of its life cycle.

BIM authoring platforms generally allow the association of various information with the single elements of the geometric model. However, often the creation of specific parameters and the filling in of the respective values can be time-consuming, excessively delaying the modelling and/or design phase, and is therefore not compatible with current workflows. It was therefore proposed to start from a BIM model in IFC format to be used both as a ge-

ometric-quantitative reference and for the visualisation of the results.

To understand the data structure of the IFC format rapidly, it was essential to refer to a simple case study, such as the calculation of the ECI in the various phases of the life cycle of a window, which facilitated the various tests carried out to understand how to manage the geometric and alphanumeric data saved in the IFC file correctly.

Furthermore, given the high flexibility and variability of LCA methods, it was decided to refer to the calculation of the ECI according to the method of monetisation of environmental performance as it allows uniform units of measurement to be used and therefore gives results with easily comparable values. The communication of results through a single value and the use of the open format also ensures a wider accessibility to data on environmental

Performance of Buildings and civil engineering works Determination, in a clear and verifiable.

Kreiner, H., Scherz, M. and Passer, A. (2018), „How to make decision-makers aware of sustainable construction?“, In Caspeepe, R., Taerwe, L. and Frangopol, D. (Eds.), *Life-Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering: Towards an Integrated Vision*, London, United Kingdom.

Loeh, R., Everett, J.W., Riddell, W.T. and Cleary, D.B. (2021), “Enhancing a Building Information Model for an Existing Building with Data from a Sustainable Facility Management Database”, *Sustainability*, Vol. 13, n. 13, 7014.

OVAM (2017), “Annex: Monetisation of the MMG method”, available at: <https://www.ovam.be/sites/default/files/atoms/files/Monetisation%20of%20the%20MMG%20method%20-%20Anex%20-%20update%202017.pdf>.

OVAM, TOTEM Prestazioni dei componenti degli edifici, available at: <https://www.ovam.be/materiaalprestatie-gebouwen-0>.

Plazza, D., Röck, M., Malacarne, G., Passer, A., Marcher, C. and Matt, D.T. (2019), “BIM for public authorities: Basic research for the standardized implementation of BIM in the building permit process”, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 323, n. 1, 012102.

Potrč Obrecht, T., Röck, M., Hoxha, E. and Passer, A. (2020), “BIM and LCA integration: A systematic literature review”, *Sustainability*, Vol. 12, n. 14, 5534.

Röck, M., Hollberg, A., Habert, G. and Passer, A. (2018), “LCA and BIM: Visualization of environmental potentials in building construction at early design stages”, *Building and Environment*, Vol. 140, pp. 153-161.

sustainability. This provides an opportunity for manufacturers of building components to promote or innovate products and services, minimising their environmental impacts, and for designers, construction companies and clients to choose solutions that optimise environmental and economic sustainability.

The research showed the potential of linking open BIM models in IFC with integrative data for the comparison of environmental impacts at different stages of the life cycle of a building component. However, the case study described here is not sufficient to make the proposed workflow generally valid. In the future, the workflow can be applied, tested and validated to other building components up to the scale of the whole building and infrastructure in order to analyse and better understand its environmental performance.

NOTES

¹ UNI 14040:2006.

² Created with Autodesk Revit 2020.

³ Website of Building Smart, IFC standard, available at: <https://www.buildingsmartitalia.org/standard/standard-bis/industry-foundation-classes-ifc/>.

⁴ Free tool: BIMvision.