

# Cradle to Cradle: Architecture beyond LCA

Rossano Albatici\*, Anna Serpelloni, Stefano Gialanella

## Highlights

Relationship between LCA and C2C approach on a case study is defined. C2C, if appropriately developed in the construction sector, can become a holistic method to analyse the environmental quality of a building. Considering the overall environmental impact, a material or an element traditionally considered non-sustainable can perform better than a so-called natural one. Analysis of the building sustainability should embrace a holistic approach, giving equal importance both to environmental and energy issues and to those related to indoor comfort, safety, health and users' satisfaction.

## Abstract

The Cradle to Cradle (C2C) approach is based on the eco-efficiency in accordance with strategies of expansion, up-cycling and enhancement of products both in environmental and social terms. Being this method currently under development, it has been mainly tested in the industrial production cycle, while in the building sector clear guidelines for the application and exhaustive reference cases are still lacking. This paper presents and discusses the application of the C2C methodology to a test building, designed for research purposes, the ZEFiRe - Zero-Energy Fishfarming Research module.

## Keywords

Upcycling, Cradle to cradle, Environmental impact, Building performance, Ecological assessment

## 1. INTRODUCTION

The Life Cycle Assessment (LCA) is an analytical method for the environmental impact evaluation of products or processes, taking into account their whole life cycle, from the retrieval of raw material to the placing on the market, the disposal and the recycling/reuse of the materials. The first standards concerning the LCA approach exist only since 2006 [1], and this is a clear indicator of the novelty of this research field. The concept underlying the LCA is the eco-efficiency of products that substantially follows a "reduction strategy", aimed to reduce the environmental impact mainly intended as consumption of energy and materials. An evolution of this concept is the Cradle to Cradle (C2C) method, that is still based on the eco-efficiency but follows a different logic, that of an 'expansion strategy', namely development, up-cycling and enhancement of products both in environmental and social terms. A paradigm

### Rossano Albatici

DICAM – Dipartimento di  
Ingegneria Civile Ambientale e  
Meccanica,  
Università degli Studi di Trento,  
via Mesiano 77, Trento, 38123,  
Italia

### Anna Serpelloni

DICAM – Dipartimento di  
Ingegneria Civile Ambientale e  
Meccanica,  
Università degli Studi di Trento,  
via Mesiano 77, Trento, 38123,  
Italia

### Stefano Gialanella

DII – Dipartimento di Ingegneria  
Industriale,  
Università degli Studi di Trento,  
via Sommarive 9, Povo (Tn),  
38123, Italia

\* Corresponding author  
Tel.: +39-0461-282622;  
fax: +39-0461-282772;  
e-mail: rossano.albatici@unitn.it

shift: from “must not” to “can do”.

The term ‘cradle to cradle’ has been introduced for the first time by Walter Stahel in 1976 [2] and further developed by McDonough and Braungart [3-4], researchers at the Environmental Protection Encouragement Agency of Hamburg (Germany). They have proposed the concept of recycling from “cradle to cradle” as reaction to the more known of the LCA, “from cradle to grave” that considers a non-virtuous life cycle end phase, where the flow of materials is managed in a linear manner without an adequate resources protection [5]. The C2C point of view is truly innovative, since, instead of focusing on minimizing the impacts, it seeks and enhances the positive aspects of the product/process in economic, social and environmental terms, in order to provide benefits not only to the environment but also directly to consumers and producers. The instruments for an adequate and practical support to the C2C have still to be defined [6]. Being the method at its early stage, they first require a phase of interpretation, testing and evaluation before the concept can be turned into something practically useful in common design and operation processes.

Setting itself in this context, the research here presented explores the possibility to apply the C2C concept to the building process. In fact, to date, the C2C has been mainly tested in the industrial production cycle, while clear guidelines are still lacking and there are few exhaustive reference application cases in the building sector. It has been therefore conducted an application on a test-building, designed for research purposes, the ZEFiRe - Zero-Energy Fishfarming Research module, a modular eco-efficient building with a steel structure, on which the LCA evaluation had already been conducted. Improvement actions are proposed in accordance with a C2C strategy.

## 2. THE C2C PRINCIPLES

Instead of trying to reduce the linear flux of materials and improving the current production processes, the C2C approach promotes their reuse and redesign in continuous cycles. Thus, a C2C analysis does not present an optimal solution but allows the comparison between criteria leading to different solutions.

The C2C fundamental principles are three, described briefly below.

“WASTE = FOOD”. This basic concept is inspired by the closed-loop nutrient cycles of nature, where every life form is a nutrient for the others. The cradle-to-cradle design seeks, from the start, to create buildings, communities and systems that generate a circular cycle. It is therefore proposed a production process in which materials are in a continuous cycle and can be reused many

## 1. INTRODUZIONE

*La Life Cycle Assessment (LCA) è un metodo per la valutazione dell'impatto ambientale di un prodotto o di un servizio, che ne prende in considerazione tutto il ciclo di vita, dal reperimento della materia prima fino all'immissione sul mercato, alla dismissione e all'eventuale fase di riciclo/riuso. Le prime norme riguardanti la standardizzazione della LCA sono del 2006 [1], a indicare un campo di lavoro ancora piuttosto recente. La strategia che sta alla base della LCA è l'eco-efficienza che, in sostanza, percorre una logica di “riduzione”, ossia di diminuzione dell'impronta ecologica intesa principalmente come consumo di materiali e di energia. Un'evoluzione di questo concetto è il Cradle to Cradle (C2C), che si basa sulla eco-efficienza secondo una logica opposta ossia di “espansione”, di sviluppo, di up-cycling, di valorizzazione del prodotto e delle sue potenzialità in termini ambientali e sociali. È un cambio di paradigma: dal “non si deve” al “si può”.*

*Il termine “cradle to cradle” è stato introdotto per la prima volta da Walter Stahel nel 1976 [2] e sviluppato ulteriormente da McDonough e Braungart [3-4], ricercatori presso l'Environmental Protection Encouragement Agency di Amburgo (Germania). Essi hanno promosso il concetto di riciclo “dalla culla alla culla” come una reazione a quello tipico della LCA “dalla culla alla tomba” che prevede un fine ciclo non virtuoso, dove il flusso di materia è gestito in maniera lineare senza un'adeguata attenzione alla protezione delle risorse [5]. Il punto di vista è realmente innovativo: invece di focalizzare l'attenzione sulla minimizzazione degli impatti, si ricercano e valorizzano gli aspetti positivi del prodotto o del servizio in termini economici, sociali e ambientali, in modo che il beneficio sia non solo ambientale ma anche direttamente percepibile dai consumatori e dalle aziende produttrici. Gli strumenti per un adeguato utilizzo pratico della C2C sono ancora in fase di definizione [6]. Essendo allo stadio iniziale, essi richiedono una fase di interpretazione, sperimentazione e valutazione prima che se ne possa avere un'evoluzione in metodi direttamente utilizzabili nella pratica quotidiana.*

*In tale contesto, viene qui presentata una ricerca con la quale si è esplorata la possibilità di applicare il concetto C2C all'ambito dell'edilizia. Il C2C è infatti un metodo ancora in fase di sviluppo, sperimentato essenzialmente nel ciclo produttivo industriale, mentre in quello edilizio non si trovano linee guida applicative chiare e sono ancora pochi gli esempi di riferimento. Si è pertanto considerata l'applicazione a una struttura progettata con scopi di ricerca, il modulo ZEFiRe - Zero-Energy Fishfarming Research, un edificio modulare eco-efficiente, realizzato con tecnologia a secco, del quale era già stata implementata l'analisi LCA e per il quale sono stati proposti interventi migliorativi secondo una logica C2C.*

times in different manners. Two categories of material transfer are introduced, biological and technical, and thus two types of metabolism: a) biological metabolism (biosphere) that reintroduces materials in the cycles of nature; b) technical metabolism (techno-sphere) that considers materials and products in a closed-cycle approach as valuable nutrients for the cycles of industry. Examples for the former are the use of biomass, the rainwater and wastewater reuse, the green-roof or anti-smog paints. For what concerns the latter, the industry sector should introduce on the market products that, once reached the end of their service life, can be completely disassembled, and whose elements can be reused. All the products and materials manufactured by industry will feed new products.

“CELEBRATE DIVERSITY”. It is proposed a reversal of the dominant “one-size for all” approach, which contemplates uniformity, towards a variety both biological and social, economic and cultural, on the assumption that complex relationships and opposing elements generate progress, while one exclusive criterion generate only instability and chaos. Examples could be using native plants, using local materials for construction, paying attention to user needs and wishes, which are often different on the basis of the place or period, and taking into consideration the local climate for an integrated building design.

“USE CURRENT SOLAR INCOME”. The C2C energy is produced and applied with high efficiency, using solar energy or materials which meet the biological or technical metabolism requirements. Relevant in this sense are the natural light, the solar and photovoltaic energy, the photosynthesis, the wind and wave power, the composting, the bio-digestion, the gasification and pyrolysis. While in the conventional planning the focus is on minimising energy demand, the C2C aims at maximising the quantity of energy that a building can produce with the use of different sources, especially local. Attention is paid to the inhabitant wellbeing and health and to the interconnection between buildings within a district.

### 3. C2C APPLIED ON THE BUILDING PROCESS

The C2C methodology has been developed within the industry sector, referred thus to products, where it still finds its major applications. However, it can be applied also to the building process and its materials. Few buildings have been yet designed according to C2C (among them, Venlo City Hall and Greenport Venlo in Netherland, Bionorica Headquarter in Germany and the Backsippans Kindergarten in Sweden, all completed after 2013) due to the lack of experienced designer and contractors, the conservatory nature of the

#### 2. I PRINCIPI C2C

*Invece che tentare di ridurre il flusso lineare di materia e di migliorare i metodi di produzione odierni, il concetto C2C promuove il loro ripensamento e la loro riprogettazione in un ciclo continuo. In tal senso, l'analisi C2C non presenta “la soluzione” ma permette il confronto fra criteri che possono portare a soluzioni differenti. I principi C2C sono fondamentalmente tre, descritti brevemente nel seguito.*

*“RIFIUTO = CIBO”. Questo principio si ispira al ciclo naturale della vita dove ogni singolo organismo contribuisce alla salute e al nutrimento degli altri, da vivo così come durante la fase di decomposizione. Si propone quindi un processo produttivo in cui i materiali sono in un ciclo continuo e possono essere utilizzati più volte con funzioni anche differenti. Si introducono due categorie di flussi di materiale, biologico e tecnico, e quindi due tipi di metabolismo: a) metabolismo biologico (biosfera) che reintroduce i materiali nel ciclo della natura; b) metabolismo tecnico (tecnosfera) che riguarda materiali e prodotti che, in un sistema produttivo a ciclo chiuso, sono preziosi “nutrienti” per l'industria. Esempi del primo tipo di metabolismo sono l'uso di biomasse, il riuso delle acque meteoriche e delle acque reflue, il tetto verde, le vernici “mangia-smog”. Per quanto riguarda il secondo tipo, invece, lo sforzo dell'industria deve essere quello di immettere sul mercato prodotti che, una volta giunti al termine della loro vita utile, possono essere completamente smontati e le cui parti possono essere riutilizzate. Gli oggetti diventano così “cibo” per nuovi prodotti.*

*“CELEBRARE LA DIVERSITÀ”. Viene rovesciato il pensiero dominante che prevede uniformità e “one-size for all”. Diversità intesa sia in senso biologico ma anche sociale, economico e culturale, con l'idea che le relazioni complesse e l'incontro di opposti genera sviluppo, mentre il criterio unico genera instabilità e caos. Esempi in tal senso sono l'uso di specie vegetali autoctone, l'utilizzo di materiali locali per le costruzioni, l'ascolto dei desideri e dei bisogni degli utenti che sono spesso differenti in base al luogo e alle epoche, l'attenzione al clima locale per la progettazione integrata degli edifici.*

*“USO DELL'ENERGIA SOLARE”. La “C2C energy” è quell'energia che viene generata e applicata con alta efficienza utilizzando o l'energia solare (e correlati/derivati) o materiali che sono definiti nutrienti biologici o tecnici. Rientrano in tal senso la luce naturale, il solare termico e fotovoltaico, la fotosintesi, l'energia eolica e del moto ondoso, il compostaggio, la biodigestione, la gassificazione, la pirolisi per citare alcuni importanti esempi. Mentre nella progettazione convenzionale si punta a minimizzare il fabbisogno energetico, la C2C punta a massimizzare la quantità di energia che un edificio può produrre anche con lo sfruttamento integrato di varie fonti, essenzialmente locali. L'attenzione è posta al benessere e alla salute degli abitanti e all'interconnessione di edifici in uno stesso distretto.*

building sector, and the scant catalogue of C2C certified products. In 2010, a first guide has been published for an architectural planning respectful of the C2C requirements [7]. This document can be seen as a manifest of the approach, in which a C2C building is defined as that characterised by measurable elements that bring added value, and promote the innovation and use of the resources along two main lines. The first regards the application of the three fundamental principles previously defined, with attention to the choice of materials and to their cycle of use, the integration of biological nutrients, the improvement of the air, water and indoor microclimate quality, the integration of renewable energy sources, the support of biodiversity, the valorisation of conceptual variety through innovation. The second line concerns the different stakeholders involved (e.g. users, contractors, financial supporter) and the enhancement of the built environment quality taking into account an economic and management point of view, the indoor air quality and the usability of spaces. The tools suggested to reach these objectives focus on the key-word “integration”, integration of different financial instruments, of partnerships, of contractors with experience in C2C, of plant systems and components, of different utilisation systems, of innovative lighting devices with daylight availability, of sustainable mobility with renewable power, of tools for user safety and protection against environmental hazards, in addition of user engagement in choices concerning aesthetic and usability of spaces.

To ensure that results are achieved, it is necessary to clearly set goals identifying design intentions according to C2C criteria, including outlining milestones, from the early design phase to the construction and the use phases, and defining a road map to be checked in each step, updated and modified to meet new needs arising. This procedure is implemented with the use of quantitative measurement tools for what concerns the technical and financial aspects (such as achieved savings, renewable energy production and indoor environmental quality) that support or call the choices made into question.

#### 4. METHODOLOGY

The ZEFiRe module is a small-scale fish-farming plant that, thanks to the clever and holistic design of the envelope and its control systems, the choice of innovative materials and technical solutions, should allow substantial reductions in costs and environmental impact of the entire production cycle. The module has the following dimensions: base 4.6mx10.6m, maximum height 5.1 m. It is internally divided into two rooms dedicated to the farming of two different species of fish: one is a native species of the Garda Lake

#### 3. L'APPLICAZIONE DEL C2C NEL PROCESSO EDILIZIO

*La metodologia C2C è nata in ambito industriale, quindi di prodotto, dove trova ancora oggi i suoi maggiori impieghi. Tuttavia essa può essere applicata anche al processo edilizio e ai suoi prodotti. Gli edifici finora progettati seguendo la C2C sono molto pochi (fra di essi, Venlo city Hall e Greenport Venlo in Olanda, Bionorica headquarter in Germania e l'asilo Backsippans in Svezia, tutti terminati dopo il 2013) sia per l'impreparazione di progettisti e committenti, sia per la natura conservativa del comparto edilizio, sia per l'assenza di un catalogo di prodotti per l'edilizia certificati C2C. Nel 2010 è stata pubblicata una prima guida alla progettazione architettonica secondo la C2C [7], che è in realtà una carta di intenti, il cui obiettivo è la valorizzazione degli impatti positivi (quindi dei benefici) piuttosto che la semplice minimizzazione di quelli negativi. In breve, la guida definisce un "edificio C2C" come quello caratterizzato da elementi misurabili che portano valore aggiunto, celebrano l'innovazione e la fruizione del bene con riferimento a due aree di intervento. La prima riguarda l'applicazione dei tre principi base definiti in precedenza, con attenzione alla scelta dei materiali e alla catena del loro utilizzo, all'integrazione dei nutrienti biologici, al miglioramento della qualità dell'acqua, dell'aria e del microclima interno, all'integrazione con energie rinnovabili, al supporto della biodiversità, alla valorizzazione della diversità concettuale attraverso l'innovazione. La seconda area riguarda gli stakeholder (utenti, committenti, finanziatori e altri) e considera il miglioramento della qualità dell'ambiente costruito sia dal punto di vista economico e di manutenzione, sia di qualità dell'aria e di fruibilità degli spazi. Gli strumenti suggeriti per arrivare a questi risultati hanno come parola d'ordine "integrazione": di diversi strumenti finanziari, anche innovativi; di partenariato; di appaltatori con esperienza C2C; di impianti, componenti e strumenti; di differenti sistemi di utilizzazione con caratteristiche relative ai criteri C2C; di dispositivi innovativi di luce artificiale con tecniche di illuminazione naturale; di mobilità sostenibile che usi le rinnovabili per la propulsione; di strumenti per la protezione degli utenti da pericoli ambientali. Oltre al coinvolgimento degli utenti nelle scelte riguardanti l'estetica e la fruibilità degli spazi. La misurabilità dei risultati passa per la chiara definizione di obiettivi (goals) che si vogliono raggiungere e che esplicitano le intenzioni progettuali secondo i criteri C2C, con la definizione temporale delle tappe principali da raggiungere (milestones) dalla fase di progettazione a quella di costruzione fino a quella di utilizzo della struttura, e quindi alla definizione di una road map che viene di volta in volta verificata, aggiornata ed eventualmente modificata secondo nuove esigenze. Questo percorso è implementato con l'utilizzo di strumenti di misura quantitativi per quanto riguarda gli aspetti tecnici e finanziari (risparmi*

(Salmo carpio, popular name: Carpione) and requires a water temperature of 10-13°C. The other one is a tropical species (Pterophyllum scalare, popular name: Angelfish) native of the Amazon River and that lives in water with temperature of 25-27°C [8]. From a structural point of view, ZEFiRE is made up of elements dry assembled on site with a steel structure and insulating synthetic materials for the roof and wall panels. The base is anchored to the concrete walls of a pre-existing tank, used as a filter for the purification of water of the host fish farm. The floor, lying on this tank, has a composite structure, made of wood boards, 6 cm thick, resting on the concrete perimetral and partition walls of the base tank. Thermal insulating pads to limit losses through the floor, made of polystyrene foils 8 cm thick, fill the gaps between tank partition walls and are kept in place by suitably shaped steel sheets.

Lateral walls of the module are composed of a structural steel frame, using metal profiles HEA120 with L 40x40x4 wind brace elements. Internal surface finishing is made of fibre-cement panels, 1 cm thick, back-reinforced by plasterboard panels, 1.25 cm thick with aluminium vapour barrier. Between the supports of the structure, there is an insulation panel of polyester (thickness 11 cm), while toward the outer side an additional layer of rigid interlocking panels of insulating polyurethane sandwiched between two steel foils coated on both sides with a sheet of steel was added.

The outer surface finish is made up of a corrugated aluminium sheet 1mm thick. The internal partition wall has the same structure as the perimeter one, but presents on both faces finishes in fibre cement panels (1 cm thick) and

*ottenuti, inquinanti emessi, energia da fonti rinnovabili prodotta, qualità dell'ambiente interno e altri), che avvalorano, o pongono in discussione, le scelte fatte.*

#### 4. METODO

*Al fine di sviluppare alcuni degli elementi sopra riportati e analizzarne i possibili impatti, in questo articolo viene presentato uno studio relativo a un edificio denominato ZEFiRe (Zero-energy Fishfarming Research), un modulo produttivo per acquacoltura definito con una progettazione integrata fra involucro e impianto, dotato di sistemi di produzione di energia da fonti rinnovabili e di un sistema di monitoraggio dei parametri prestazionali in continuo (Figura 1). Sviluppato su un unico piano con una pianta rettangolare di 49 m<sup>2</sup>, è suddiviso al suo interno in due locali: uno per l'allevamento di una specie nativa del Lago di Garda (Salmo carpio, comunemente Carpione) che richiede acqua a una temperatura di 10-13°C; l'altro dedicato a una specie tropicale nativa del Rio delle Amazzoni (Pterophyllum scalare, comunemente Scalare o Pesce angelo) che richiede acqua a una temperatura di 25-27°C [8].*

*ZEFiRe è un modulo costruttivo assemblato in loco e a secco, caratterizzato in prevalenza da una struttura portante in acciaio e materiali isolanti di tipo plastico. La struttura sorge sopra una vasca di purificazione delle acque utilizzate per l'allevamento ittico, della quale sono state sfruttate le pareti in cemento armato come ancoraggio e appoggio della struttura e del solaio di base, caratterizzato da un isolante di polistirolo (sp. 8 cm) e un tavolato di finitura (sp. 6 cm). La struttura portante è costituita da un'intelaiatura di acciaio realizzata con profili*



Figure 1. ZEFiRE module: south-west view.

plasterboard panels (1.25 cm thick) without any aluminium vapour barrier. Between the steel supports, an insulation of polyester, filled with a thickness of 10 cm, has been placed. Also in this case, the same configuration as for the external wall has been adopted. Even the structure supporting the roof consists of steel elements and is made of two overlapped layers: the first with elements IPE160 separated by a distance of 2.5 m; the second layer is realised with elements UNP120 placed at intervals of 1.15 m. The finishing intrados is in 3 cm thick Rockfon panels, with sound-absorbing function, and plasterboard panels with a vapour barrier in aluminium foil. In the frame of the roof, polyester insulation (thickness 11 cm) is placed, coated on the front with panels of rigid polyurethane. A silicon solar photovoltaic panel (PV) plant, with an installed power of 6.9 kWp, is located on the top face of the roof cover. As regards the apertures, the module presents a service gate with a sectional door and four windows on the north side. On the east side is located the entrance door. The frames of both windows and doors are made of aluminium. The windows have insulated opaque panels, since they have no light function but are just for internal ventilation.

The LCA evaluation has been conducted following the recommendations of ISO 14040 standard [1] using the Ecosoft by IBO software. A parametric analysis was carried out by repeating the LCA analysis of the module, changing the specifications of the following elements: building structure, replacing the steel elements with profiles of laminated wood; insulation, replacing the polyester and polyurethane insulation pads with wood fibre; cladding, replacing the corrugated aluminium profile with wooden boards. The computing unit is a square meter of structure. Thermal transmittance of the walls was considered to be invariant not to affect the resulting energy efficiency of the module. Single and combined effects have been evaluated, comparing the variation of the six environmental impact indexes considered in the LCA methodology (global warming potential, ozone depletion potential, acidification potential, photochemical oxides creation potential, primary energy quantity of renewable energy resources, eutrophication potential). A more complete and detailed description is provided in [9].

The C2C analysis is both qualitative and quantitative. Three main aspects have been considered: quality and reuse of materials; energy production and consumption; usage and maintenance. For the sake of brevity, this paper will present and discuss the results of the first aspect. The analysis has been conducted separately for the roof, the external walls, the floor and the building in its entirety.

Quality and reuse of materials. First, the quality of the materials used has been

*HEA120 ed elementi L40x40x4 di controvento. L'involucro è costituito da pannelli in fibrocemento (sp. 1 cm) rinforzato posteriormente con pannelli di cartongesso (sp. 1,25 cm) dotati di barriera al vapore, isolante in poliestere (sp. 11 cm) irrigidito da uno strato ulteriore di pannelli rigidi in poliuretano, e da un'ondulina in alluminio come finitura esterna (sp. 0,1 cm). La struttura portante della copertura è caratterizzata da elementi in acciaio ed è costituita da due orditi: il primo realizzato con profili IPE160 (interasse 250 cm), il secondo da elementi UNP120 (interasse 115 cm). La parte interna della copertura è caratterizzata da pannelli Rockfon (sp. 3 cm) con funzione fonoassorbente e da pannelli di cartongesso muniti di barriera al vapore. Nell'intelaiatura è stato posto isolante in poliestere (sp. 11 cm) rivestito sul lato esterno da pannelli rigidi di poliuretano. Su tale pacchetto è stato fissato l'impianto fotovoltaico. Il modulo presenta sul lato nord un portone con apertura sezionale e quattro finestre, e una porta di accesso sul fronte est. Tutti i serramenti sono costituiti da profili in alluminio. Le finestre svolgono solo una funzione di areazione dell'ambiente e per tale motivo sono munite di pannello opaco isolate e non trasparente.*

*L'analisi LCA del modulo è stata eseguita secondo quanto indicato dalle norme ISO della serie 14040 [1] utilizzando il software Ecosoft della IBO. Oltre ad avere un quadro globale della sostenibilità dell'edificio nello stato attuale, sono stati valutati anche i cambiamenti a livello di impatto ambientale ottenuti tramite tre varianti applicate alle chiusure verticali e alla copertura relativamente a: struttura (sostituita con elementi in legno), isolamento (sostituito con fibra di legno), finitura esterna (sostituita con tavole di legno). L'unità funzionale è il metro quadrato di superficie areica. L'invariante è la trasmittanza termica dell'elemento considerato. Sono stati valutati sia gli effetti singoli sia quelli combinati. È stata confrontata la variazione del valore dei sei effetti ambientali considerati nella metodologia LCA (potenziale di riscaldamento globale, riduzione dello stato di ozono, potenziale di acidificazione, ossidazione fotochimica, contenuto energetico primario da fonte non rinnovabile, potenziale di eutrofizzazione) e degli indicatori ambientali (indici di sintesi) relativi. Per una descrizione completa e dettagliata, si veda [9].*

*L'analisi C2C è in parte qualitativa in parte quantitativa. Sono stati presi in considerazione tre principali aspetti: qualità e riciclo dei materiali; produzione e consumo di energia; costruzione, manutenzione e utilizzo. Per brevità di trattazione, in questo articolo viene esposto e discusso il primo aspetto. L'analisi è stata condotta singolarmente per la copertura, le pareti esterne, la pavimentazione e per l'edificio nella sua globalità.*

*Qualità e riciclo dei materiali. Il primo passo è la verifica della qualità dei materiali impiegati, considerando il loro livello di tossicità durante il ciclo di vita (produzione, posa in opera, utilizzo, riciclo). Sono stati considerati sia gli impatti sull'ambiente sia sulla salute umana. Il metodo utilizzato è*

verified, considering their toxicity levels during the life cycle (production, installation, use, recycle) both in terms of impacts on environment and on human health. The method used is CLM2001 (Centre of Environmental Science - Leide University) that considers four categories of impacts: greenhouse gas emissions, human toxicity, eco-toxicity and other effects, such as odours and land use. This first quantitative phase was followed up by a qualitative phase that, through a careful analysis of the information related to each single material and its components, led to define the recyclability rate. Six groups have been identified:

- cradle to grave material: completely not-recyclable after its use;
- recycled material: partially or completely recycled before its current use;
- recyclable material: partially or completely recyclable after its use;
- toxic process material, whose recycling process presents hazards for human health and/or environment;
- upcycle material: after the recycle, the material properties are maintained or improved;
- downcycle material: after the recycle, the material properties are reduced and the material is more difficult to decompose into its components.

Databases with information on the recycling process of materials are few and incomplete. Therefore, it has been possible to consider only the elements provided with adequate information, implemented referring to the document “Cradle to Cradle Certified CM product standard”, version 3.0 [10].

## 5. RESULTS AND DISCUSSION

Results from the LCA analysis have been already discussed in [9]. Here, some outcomes are reported, referring only to an environmental indicator, so as to allow comparisons with the C2C analysis. The environmental indicator considered is OI3, relative to one square meter of structure, element or material, defined by IBO as the arithmetical mean of the following indicators: global warming potential, primary energy quantity of renewable energy resources and acidification potential. As shown in Table 1, in the construction phase the original module presents an environmental impact 17% higher than the other three variants applied concurrently. However, evaluating the three variants individually, an unexpected result arises: the replacement of the insulation material, from polyester to wood fibre, increases the environmental impact (+1.5%), even though wood fibre is considered as a more sustainable material. This is due to the fact that more volume is necessary, increasing thus the weight and the transport and installation energy needed. The situation is only slightly improved with the installation of wood finishing (-4.3%) while the

*CLM2001 (Centre of Environmental Science - Leide University) che considera quattro categorie di impatti principali: emissione di gas “effetto serra” (GHG emission), livello di tossicità per l'uomo (human toxicity), livello di tossicità per l'ambiente (Ecotoxicity), altri effetti (fra cui odori e consumo di suolo). A questa prima fase quantitativa ne è seguita una prevalentemente qualitativa che, attraverso un'attenta analisi delle informazioni relative al singolo materiale e ai suoi componenti, ha portato alla definizione del “grado di riciclabilità”. Sono stati considerati 6 parametri principali:*

- *materiale “cradle to grave”:* completamente non riciclabile dopo l'utilizzo;
- *materiale riciclato:* parzialmente o completamente riciclato prima dell'uso attuale;
- *materiale riciclabile:* che può essere parzialmente o completamente riciclato dopo l'uso;
- *processo tossico:* il processo di riciclaggio è tossico per la salute umana e per l'ambiente;
- *Upcycle:* dopo la fase di riciclo, il materiale mantiene o migliora le sue qualità;
- *Downcycle:* dopo la fase di riciclo, il materiale riduce le sue qualità ed è più difficile da scomporre nei suoi elementi principali.

*Le banche dati riguardanti il processo di riciclo dei materiali sono poche e incomplete, pertanto sono stati considerati solo gli elementi per i quali si era in possesso di informazioni adeguate, implementati con riferimento al documento “Cradle to Cradle Certified CM product standard” versione 3.0 [10].*

### 5. RISULTATI E DISCUSSIONE

*I risultati dell'analisi LCA sono già stati presentati e discussi in altra pubblicazione [9]. Se ne riportano qui alcuni esiti, con particolare riferimento al solo indicatore ambientale, al fine di evidenziare e comprendere il paragone con l'analisi C2C. L'indicatore ambientale considerato è OI3, relativo a un metro quadrato di struttura, elemento o materiale, definito da IBO come la media aritmetica fra i valori di indicatore degli effetti ambientali: “potenziale di riscaldamento globale”, “contenuto energetico primario da fonte non rinnovabile”, “potenziale di acidificazione” (considerati come i più rappresentativi ai fini dell'analisi LCA). Come si nota in Tabella 1, nella fase di costruzione il modulo originario presenta un impatto ambientale del 17% più elevato rispetto al modulo con tutte e tre le varianti applicate contemporaneamente. Tuttavia, se si vanno a valutare le varianti singolarmente, emergono risultati inattesi: la modifica dell'isolamento termico (da poliestere a fibra di legno) peggiora l'impatto ambientale (+1.5%) anche se la fibra di legno è considerata, in prima istanza, un materiale più sostenibile. Entrano qui in gioco, a parità di trasmittanza termica, il maggior volume necessario, quindi il peso e l'energia per trasporto e posa in opera. Migliora di poco la situazione con la finitura in legno (-4.3%) mentre la struttura in legno*

major influence is that of the timber structure (+56.1%), with an impact 46% lower than the original. This seems to be the best design solution.

From the LCA analysis, it emerges that the environmental impacts of the structure, insulation and external finishing are respectively 23%, 25% and 18%. These percentages are not consistent with those outlined from the C2C analysis, whose results are shown in Table 2 and in Table 3, respectively referring to the original module (steel configuration) and to the module with all the variants applied (wooden configuration).

Firstly, it can be noticed that the effects in terms of GHG emissions are lower than those on human toxicity and on the environment. Materials can be toxic not only during the production phase but they can also continue to release harmful components into the atmosphere during all their life cycle, becoming ever more threatening in confined spaces and for a prolonged exposure.

Considering this latter aspect is therefore fundamental to make a sustainable and conscious choice during the planning phase.

The component that presents the minor impact on the environment and human health is the external finishing in aluminium, with an effect much lower than the wooden finishing, followed up by the wood fibre insulation (from 50% up to 75% more salubrious, except for the toxicity), unlike in the LCA analysis where the latter had the greatest impacts. The impacts attributed to the load-bearing structure (primary and secondary) are equivalent or essentially comparable in the two configurations, where the secondary structure in timber performs slightly better than that made out of steel.

The results of the qualitative analysis are synthesized in Figure 2. It can be seen as the steel configuration has a lower environmental impact than the wooden configuration, in contrast with the LCA analysis.

In particular, for what concerns the insulation material, the polyester panels derive from a recycled material, making this not toxic material a downcycling material, which can be recycle several times. However, this recycling process can be hazardous for the operators because it can release components that can alter the endocrine system. On the contrary, the wood fibre insulation derives from a natural material (the timber production waste), that is subjected, to ensure an optimum behaviour in time, to protective treatments that can be toxic during the production and recycle phase. For this reason, the wood fibre

*ha l'influenza maggiore (-42%). In fase di esercizio, invece, l'indice sostanzialmente raddoppia per tutte le soluzioni tranne che per l'edificio tutto in legno (+56.1%), che ha un impatto inferiore a quello originario del 46%, e si rivela pertanto la soluzione progettuale migliore.*

*Dallo studio LCA è risultato che l'impatto ambientale di struttura, isolamento e finitura esterna è rispettivamente del 23%, del 25% e del 18%. Queste percentuali non sono rispettate nell'analisi C2C relativa alla tossicità dei materiali, i cui risultati sono riportati in Tabella 2 e in Tabella 3, rispettivamente per l'edificio originario (edificio acciaio) e per quello con tutte e tre le varianti applicate (edificio legno).*

*Per prima cosa si nota chiaramente che gli effetti a livello di emissioni di gas climalteranti in atmosfera (GHG emission) sono meno impattanti degli effetti sulla tossicità per l'uomo e per l'ambiente. I materiali possono essere tossici non solo in fase di produzione ma possono continuare a rilasciare elementi nocivi in atmosfera (tanto più pericolosi se in ambiente confinato e per lunghe esposizioni) durante tutto il ciclo di vita.*

*Quest'ultimo aspetto, non considerato dall'analisi LCA, si configura quindi come fondamentale per avere un quadro completo al fine di effettuare una scelta sostenibile e consapevole in fase di progettazione.*

*Si nota in particolare che l'elemento con minore effetto sulla qualità ambientale e sulla salute umana è la finitura esterna in alluminio, con un impatto irrisorio e molto minore alla finitura in legno, seguita dal materiale isolante in fibra di legno (dal 50 al 75% più salubre, tranne che per la Ecotossicità) che, a una analisi LCA, risultava invece il più impattante. Gli effetti della struttura portante (secondaria e principale) sono invece sostanzialmente comparabili, laddove gli indici della struttura secondaria in segati di legno sono generalmente maggiori di quella in acciaio. Infine, gli indici della struttura principale in legno sono generalmente inferiori a quella in acciaio.*

*I risultati dell'analisi qualitativa sono riassunti in Figura 2, da cui si evince come l'edificio "acciaio" abbia un impatto ecologico minore di quello "legno", esattamente l'opposto dell'analisi LCA.*

*Nel dettaglio, per quanto riguarda il materiale isolante, i pannelli in poliestere derivano da materiale riciclato, e questo è un elemento a favore di un materiale non tossico che può essere riciclato più volte (downcycling). Tuttavia, il processo di riciclaggio del poliestere può essere pericoloso per gli operatori in quanto può rilasciare sostanze tossiche che possono alterare il sistema endocrino causando effetti nocivi alla salute. Per contro, l'isolante in fibra di legno è un*

Indicatore	ZEFiRe	Struttura	Isolamento	Finitura	Tutto legno
O13 TOT (costruzione)	1015	714	1030	973	864
O13 TOT (manutenzione)	1970	1360	2038	1893	1349

Table 1. LCA analysis results – Environmental indicator values.



Indicatore	Finitura esterna alluminio	Struttura acciaio secondaria	Struttura acciaio principale	Isolante poliestere
GHG emission	3.52*10 <sup>-3</sup>	4.283	14.278	4.886
Human toxicity [kg 1.4-DB eq]	1.59*10 <sup>-3</sup>	19.945	66.484	3.837
Ecotoxicity [kg 1.4-DB eq]	1.67*10 <sup>-3</sup>	14.224	47.415	0.775
Altri effetti	2.97*10 <sup>-3</sup>	12.658	42.193	3.608

Table 2. C2C analysis result on the quality of materials – Steel configuration.

Indicatore	Finitura esterna legno	Segati struttura secondaria	Struttura lamellare principale	Isolante fibra di legno
GHG emission	9.228	14.634	19.935	1.635
Human toxicity [kg 1.4-DB eq]	47.010	16.645	21.319	1.225
Ecotoxicity [kg 1.4-DB eq]	14.286	21.245	31.141	1.517
Altri effetti	19.331	28.227	34.774	1.795

Table 3. C2C analysis result on the quality of materials – Wooden configuration.

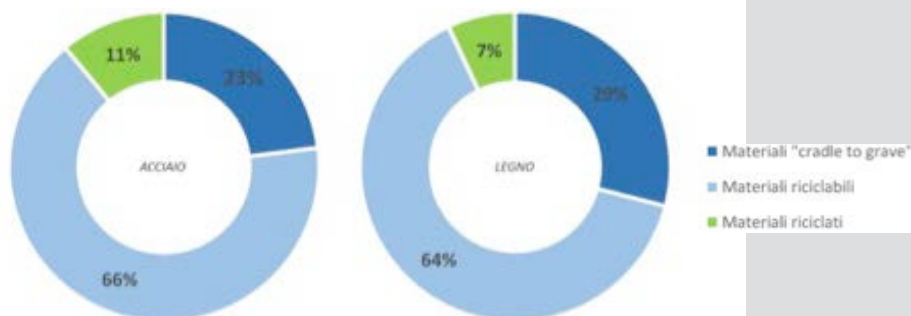


Figure 2. C2C analysis results: qualitative comparison between steel and wooden configuration.

is considered a “cradle to grave” material.

The steel structure (both primary and secondary) is a recyclable element that retains its properties unaffected. However, the toxicity level of the process needs to be carefully verified, since the structure is generally protected with fireproof and corrosion-resistant materials. The timber structure is completely recyclable, by realizing other elements (upcycling) or by producing energy through the combustion. Glulam products contain glue and impregnating agents, so the type of treatment needs to be verified to highlight potential toxicity. Same considerations can be made for the external finishing, for which it is necessary to evaluate the toxicity level of paints and varnishes used to protect the materials from weathering.

## 6. CONCLUSIONS

Despite being only an extract from a more articulate study, the work here

materiale “naturale” che deriva dai residui della produzione del legno. Peraltro, subisce trattamenti protettivi al fine di garantirne le prestazioni in opera che possono essere tossici in fase di produzione e di riciclo. Per tale motivo, la fibra di legno è considerata un materiale “cradle to grave”.

La struttura in acciaio (sia principale sia secondaria) è considerata un elemento riciclabile che mantiene le proprie proprietà prestazionali inalterate. Tuttavia, va verificato con attenzione il livello di tossicità del processo, in quanto la struttura è in genere protetta con materiali antincendio e anticorrosione. Anche la struttura in legno è completamente riciclabile (sia per realizzare altri elementi - upcycling - sia per produrre energia con la combustione). Ovviamente, il legno lamellare contiene colle e impregnanti, per cui anche in questo caso va verificato il tipo trattamento utilizzato per evidenziare eventuali tossicità.

Stesse considerazioni possono essere fatte per l'elemento di finitura esterna. In questo caso, va preso in considerazione l'effetto di tossicità della vernice e dell'impregnate utilizzati per proteggere il materiale

presented has revealed the complexity of the issues addressed and indicates how an analysis of the building sustainability should embrace a holistic approach, giving equal importance both to environmental and energy issues and to those related to indoor comfort, safety, health and users' satisfaction. Quantitative and reductionist aspects alone, whose parameters are often difficult to interpret and can lead to conflicting results depending on the calculation algorithms used to estimate them, leads to a precautionary approach, while wider considerations that also take into account qualitative elements can highlight possibility of development and intelligent reuse of resources in a continuous and virtuous cycle. Because of difficulties in measuring qualitative aspects, these are complex to define and require multi- and transdisciplinary competence, whose development and incorporation are still at an early stage.

## 7. ACKNOWLEDGEMENTS

The research has been conducted in partnership with prof. Werner Lang of the Technische Universität München and with dr. Tammy and Martin Korndoerfer, members of the Environmental Protection Encouragement Agency (EPEA) in Hamburg (Germany).

## 8. REFERENCES

- [1] ISO 14040:2006, *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*. Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2007.
- [2] Stahel W.R.; Reday-Mulvey G., *Jobs for tomorrow: the potential for substituting manpower for energy*. USA: Vantage Press, 1981.
- [3] McDonough W.; Braungart M., *Dalla culla alla culla. Come conciliare tutela dell'ambiente, equità sociale e sviluppo*. Torino: Blu edizioni srl, 2003.
- [4] McDonough W.; Braungart M., *The upcycle. Beyond sustainability – Designing for Abundance*. New York (USA): Melcher Media, 2013.
- [5] <<http://epea-hamburg.org/en/content/cradle-cradle-design-concept>>. (Accessed 3/10/2015).
- [6] Van der Grinten B., *Cradle to Cradle in a nutshell. C2C summary and design tools*, <<http://www.bluehaired.com/corner/wp-content/uploads/2009/12/Cradle-to-Cradle-in-a-nutshell-Bram-van-der-Grinten-2008.pdf>> (Accessed: 3/10/2015).
- [7] Douglas M.; Braungart M., *Cradle to Cradle Criteria for the built environment*. Germany: EPEA Internationale Umweltforschung GmbH, 2010.
- [8] Lunelli F. [et al.], Rearing of Carpione Salmo carpio, an Endemic Salmonid in Lake Garda, «World Aquaculture Magazine», 4 (2012), p. 46-49.
- [9] Albatici R. [et al.], Parametric life cycle assessment of an experimental building for aquaculture. In: Proceedings of the 3rd International Exergy Life Cycle Assessment and Sustainability Workshop & Symposium (ELCAS3), Nisyros (Greece), 7-9 luglio 2013, a cura di C. Koroneos, D. Rovas, A. Dompros. 2013, p. 1275-1286.
- [10] Cradle to Cradle Products Innovation Institute. *Cradle to Cradle CertifiedCM product standard Version 3.0.*, <[http://www.c2ccertified.org/images/uploads/C2CCertified\\_Product\\_Standard\\_V3.pdf](http://www.c2ccertified.org/images/uploads/C2CCertified_Product_Standard_V3.pdf)>. (Accessed: 3/10/2015).

dagli agenti atmosferici.

## 6. CONCLUSIONI

*Il lavoro presentato in questo articolo, nonostante sia un'esposizione parziale di uno studio più articolato, rivela la complessità dei temi trattati e indica come l'analisi di sostenibilità di un edificio dovrebbe adottare un approccio integrato, nel quale gli aspetti macro-ambientali ed energetici (spesso gli unici finora utilizzati) sono importanti quanto quelli relativi al comfort indoor, alla sicurezza, alla salute e al grado di soddisfazione degli utenti. Il solo ricorso ad aspetti quantitativi e riduzionisti (i cui valori sono spesso difficili da interpretare e possono portare a risultati contrastanti anche in base agli algoritmi di calcolo con cui vengono stimati) porta a un approccio "di minimo", mentre considerazioni più ampie che valutino anche elementi qualitativi (oltre a quelli misurabili) possono evidenziare possibilità di sviluppo e riuso intelligente delle risorse in un ciclo continuo e virtuoso. Proprio per il loro aspetto spesso non facilmente quantificabile, questi ultimi aspetti sono complessi da definire e richiedono competenze multi e transdisciplinari il cui sviluppo e la cui integrazione sono ancora allo stadio iniziale.*

## 7. RINGRAZIAMENTI

*Lo studio è stato condotto in collaborazione con il prof. Werner Lang della Technische Universität München e con i dr. Tammy e Martin Korndoerfer, membri della Environmental Protection Encouragement Agency (EPEA) con sede ad Amburgo (Germania).*