

Roberto Giordano, Elena Montacchini, Silvia Tedesco,  
Dipartimento Architettura e Design, Politecnico di Torino

roberto.giordano@polito.it  
elena.montacchini@polito.it  
silvia.tedesco@polito.it

**Abstract.** L'interesse per l'approccio al ciclo di vita di un edificio negli ultimi anni è evidenziato dall'implementazione di norme tecniche (CEN/TC 350) e dallo sviluppo di strumenti dedicati (ITACA, LEED®). Sebbene il quadro di riferimento possa essere giudicato completo e articolato, i requisiti attraverso i quali è possibile esprimere il livello di ecocompatibilità di un prodotto hanno delle difficoltà a essere contemplati in fase di progettazione e, laddove considerati, sono ricondotti a metodi eccessivamente semplificati di valutazione.

Il progetto GRE\_EN\_S ha costituito un importante caso studio per dimostrare che è possibile, attraverso un processo di collaborazione interdisciplinare e una metodologia di ricerca appropriata, progettare e costruire prodotti a basso impatto ambientale.

**Parole chiave:** Progettazione esecutiva, Produzione edilizia, Approccio al ciclo di vita, Life Cycle Assessment, Facciata verde

**L'approccio al ciclo di vita dell'edificio** La valutazione delle prestazioni di un edificio in un'ottica di ciclo di vita – o secondo l'accezione anglosassone Life Cycle Approach – è il risultato di un percorso evolutivo associato all'esigenza di connotare in chiave ecocompatibile l'intero processo edilizio, valutando, accanto ai consolidati requisiti di efficienza energetica del sistema edificio-impianto, altri requisiti, in particolare, i requisiti ambientali dei prodotti edilizi.

Uno dei principali, nonché recenti, strumenti normativi cui fare riferimento è certamente lo standard CEN/TC 350 – “Sustainability on constructions works”. Lo standard propone una metodologia omnicomprensiva finalizzata alla valutazione delle prestazioni ambientali e dei costi delle fasi del ciclo di vita dell'edificio, includendo nel processo di valutazione anche aspetti connessi al benessere e al comfort degli occupanti.

Lo standard CEN si accompagna ad altri strumenti e metodi sviluppati a partire dalla seconda metà degli anni '90.

Tra questi sono annoverati i sistemi di valutazione dell'ecom-

patibilità di un edificio, che possono essere classificati come segue (San-josè Lombera, 2010):

- sistemi a check-list e/o sistemi pesati, che prevedono la verifica di determinate strategie secondo un principio di presenza vs assenza;
- sistemi a punteggio, basati su un approccio di tipo esigenziale (esigenze-requisiti-prestazioni);
- sistemi suddivisi per categorie di impatto, organizzati attraverso indicatori specifici (ad esempio, Fabbisogno di Energia Primaria ed Effetto Serra equivalente) che sono il risultato di un processo di caratterizzazione ambientale di informazioni precedentemente raccolte.

### ***I limiti attuali nell'applicazione dell'LCA in edilizia***

La maggior parte dei sistemi precedentemente descritti utilizza come standard di riferimento la UNI EN ISO 14040: “Life Cycle Assessment (LCA)”, oppure definisce un perimetro di analisi e verifica che si riferisce ai principi del Life Cycle Design (Giordano, 2010; Keoleian, 1993).

Sebbene questi sistemi abbiano raggiunto, al pari dello standard CEN, un livello di maturità tale da essere considerati efficaci nel valutare l'ecocompatibilità di un edificio, vi sono alcuni elementi che ne riducono le potenzialità come strumenti strategici in grado di orientare i processi progettuali e costruttivi. Uno di questi è da imputare alla loro incapacità di incidere in modo significativo in alcune fasi del processo di progettazione e nelle fasi di produzione fuori opera e in opera (inclusa la demolizione). Altri elementi sono strettamente correlati alla metodologia LCA, la cui articolazione e complessità richiede competenze specifiche,

## Life Cycle Approach to designing, manufacturing and assessing a Living Wall System

**Abstract:** In recent times Life Cycle Approach in building design and construction was set up by means technical standards (e.g. CEN/TC 350) as well as comprehensive impact assessment methods (e.g. LEED® and ITACA). Although standards and methods may be considered as accurate and exhaustive, product and system design needs a further organisation and systematisation of those environmental requirements tricky to take into account in preliminary design. It stands to reason such trickiness becomes more important in industrial research projects.

Starting with the assumption that there is an urgent need to overcome the gap between design and production, the paper deals with the outcomes of a research project focused on detailed designing, manufacturing and monitoring of a Living Wall System (LWS) aimed at carrying into action a Life Cycle Approach.

**Keywords:** Detailed design, Building manufacturing, Life Cycle Approach, Life Cycle Assessment, Living Wall System (LWS)

### **The life cycle approach to building**

The environmental impact assessment of a building over its life cycle – known as Life Cycle Approach – can be assumed as an outcome of an evolutionary process aimed at characterising as green the whole building process. Besides mandatory requirements such as those related to building energy efficiency, building design should encompass a larger number of requirements, especially those one related to materials and building systems.

With reference to the notion of building life cycle the CEN/TC 350 - Sustainability on constructions works – is one of the main standard available in order both to assess the sustainability

aspects of new and existing construction works. The CEN standard describes a harmonized methodology for assessing the environmental performance of buildings and the life cycle cost performance. Further the standard intends to assess those aspects related to health and comfort of a building.

The CEN standard, even if may be considered as the most exhaustive method currently available, follows-up the development of several methods aimed at assessing the environmental performance of buildings. These methods were set up starting from the second half of the nineties and they are based on the following assessment systems (San-josè Lombera, 2010):

- Score cards or project check list, such as LEED International® and SB100 (I);
- Eco-indicator or Eco-points, such as ENVEST (UK), CASBEE (J) and ITACA (I);

un'elevata mole di dati da elaborare nonché tempi di attuazione piuttosto lunghi, spesso incompatibili con i tempi ordinari di progettazione e di realizzazione di un qualsiasi manufatto edilizio.

Un ultimo aspetto che contribuisce a limitare le potenzialità di applicazione della metodologia LCA in edilizia è da imputare al carattere 'accessorio' che gli attori del processo edilizio le hanno sino ad oggi attribuito, utilizzandola come strumento per l'auto certificazione ambientale o, peggio, per il *green-washing*, mantenendo invariate le logiche di produzione fuori opera dei prodotti secondo l'approccio "end of pipe".

### **Le opportunità di interazione tra progettazione esecutiva, produzione edilizia e valutazione sistemica**

La portata innovativa della metodologia LCA è stata per molti anni sminuita dall'attenzione posta alla verifica di requisiti legati alla progettazione preliminare (basti pensare agli indicatori utilizzati da sistemi di valutazione come LEED® o ITACA), trascurando l'importanza della valutazione in fase di progettazione esecutiva e, successivamente, di produzione.

La progettazione preliminare non riesce a verificare se il prodotto è il risultato di un processo di selezione accurato di materie prime o, meglio, di materie prime secondarie, oppure se le stesse provengono da una filiera di produzione locale.

Nell'ambito delle strategie da mettere in atto per migliorare la sostenibilità del processo edilizio, è necessario incoraggiare il trinomio: progettazione esecutiva, produzione edilizia e valutazione sistemica, affrontando alcune sfide cruciali. Innanzitutto è necessario superare i limiti imposti da molti sistemi di valuta-

- Impact categories (e.g. Cumulative Energy Demand and Global Warming Potential), such as BREEAM (UK), Eco/Quantum (NL).

#### **Life Cycle Assessment: why did not it succeed?**

The above mentioned systems include as reference method the ISO 14040: Life Cycle Assessment (LCA) otherwise they set up a methodology based on the Life Cycle Design criteria (Giordano, 2010; Keoleian, 1993). Within Life Cycle Design, LCA is assumed as a reference standard within a larger number of standards and tools.

Despite the CEN standard as well as the described systems can be assumed as reliable to assess the environmental impacts of a building, two aspects lessen their potentiality and their broad use as strategic tool in the design process. The former is strictly related to LCA. It is

supposed as a highly data-demanding and work intensive method. The latter is related to the difficulties – ascribable to assessment systems – to create a correlation between the design stages and between design and building manufacturing or building deconstruction.

Additionally LCA requires lot of efforts regarding the data collection, the interpretation of results as well as expertise in specific software.

As consequence a full LCA of a building is definitely not a straightforward process like for other products and sectors.

The ancillary bestowed to LCA from construction stakeholders may be assumed as another critical issue to tackle. Until now LCA studies were mainly used within the well known "end of pipe" approach as a simple self-environmental labelling for marketing or greenwashing purposes.

zione, estendendone l'utilizzo a tutte le fasi della progettazione. Inoltre, occorre stabilire nuovi meccanismi di collaborazione con il settore produttivo, introducendo nel processo decisionale le strategie e i criteri che fanno capo al Life Cycle Approach e utilizzando la metodologia LCA in modo efficace per lo sviluppo di prodotti ed elementi tecnici.

Il progetto di ricerca e sperimentazione di seguito illustrato ha colto le sfide appena descritte come opportunità per innescare un meccanismo di partecipazione tra i diversi attori del processo edilizio e per porre il concetto di ciclo di vita a denominatore comune delle attività di progettazione, produzione e monitoraggio.

### **Il progetto GRE\_E\_S (GREen\_Envelope\_System): una facciata verde in un'ottica di ciclo di vita**

Le prestazioni ecologico-ambientali, attribuibili alle tecnologie di verde verticale, green façades e Living Walls System (LWS), si riferiscono alla riduzione dell'effetto isola di calore, al miglioramento del comfort acustico, alla riduzione dei fabbisogni per raffrescamento e riscaldamento, alla diluizione di alcuni inquinanti come i Composti Organici Volatili (VOC) e al mantenimento della biodiversità (Weinmaster, 2009).

Recentemente alle facciate verdi sono state riconosciute anche altre importanti funzioni, quali, ad esempio, quelle di natura economico-sociale, legate alla possibilità di coltivare in verticale, oppure di natura psicoperceptiva, legate alla riduzione dello stress e al miglioramento della salute degli utenti (Bringslimark et al., 2006).

#### **How to enhancing the environmental sustainability in the construction sector**

The attention paid to systems such as LEED® or ITACA played a role to weaken the LCA diffusion in the construction sector.

The preliminary design or conceptual design has become the main field for assessing the building environmental sustainability.

Preliminary design often does not allow to taking into account if the building materials are local, or if "ceteris paribus" they are manufactured through a high percentage of secondary raw materials. Thus passing-over the detailed design the mentioned systems make trickier the implementation of some environmental strategies such as: product system and material life extension, material intensity reduction, efficient distribution, etc.

Gli effetti ambientali della vegetazione a scala urbana ed edilizia sono indagati nella letteratura scientifica internazionale fin dagli anni Settanta.

Architectural technology would have had encouraging a closer cooperation with building manufactures in order to promote a broader adoption of life cycle strategies.

It should be encouraged the environmental sustainability in the construction sector through a close cooperation among: detailed design, building production and comprehensive assessment methods. Such synergism need to be tackled in the next future as follows:

- on the one hand it is crucial a better environmental requirements characterisation in the design process in order to overcome the current limits (e.g. splitting up the assessment procedure into stages consistent to the design ones: preliminary, detailed, etc.);

- on the other hand the architectural technology should "have a hand at" implementing the life cycle design in the production system bridging the gap

Per la progettazione di una parete verde tali prestazioni sono sostanziali, ma non possono assumersi come esaustive laddove vi sia l'obiettivo dell'ecocompatibilità in tutte le fasi del ciclo di vita. Una parete verde è realizzata attraverso un elevato numero di materiali, elementi e componenti. Nel rispetto dei requisiti previsti dallo standard tecnico europeo CEN/TC 350, la valutazione della fase di produzione è da considerarsi fondamentale per minimizzare gli impatti ambientali, attraverso la riduzione del numero di materiali e componenti impiegati e l'ottimizzazione dell'utilizzo di materie prime e materie prime seconde. Oltre alla fase di produzione, è necessario considerare gli impatti a fine vita, affinché materiali e componenti non debbano essere smaltiti come rifiuti speciali e pericolosi. Come evidenziato in alcuni articoli (Bianchini e Hewage, 2012; Vila et al., 2012), è essenziale considerare nuovi materiali che possano sostituire quelli attualmente utilizzati, soprattutto quelli derivanti da materie prime non rinnovabili, al fine di assicurare una complessiva compatibilità ambientale del sistema.

### **Obiettivi**

Coerentemente con un approccio legato al ciclo di vita, GRE\_EN\_S (GREen Envelope System) è un progetto di ricerca finalizzato alla progettazione, alla realizzazione e al monitoraggio di un "sistema parete verde" LWS modulare, costituito da materiali selezionati da filiere di recupero di scarti industriali, nell'ottica di ridurre la quantità complessiva di materiali e semilavorati e di ottimizzare le fasi di assemblaggio, esercizio, manutenzione e smaltimento. In particolare obiettivo del progetto è lo sviluppo di un nuovo brevetto di LWS, a partire dall'ibridazione tecnologica e dal miglioramento prestazionale di due prodotti industriali esistenti:

una struttura modulare per pareti assemblate a secco (brevetto BYBOX® dell'azienda CEIT) e un pannello modulare per facciate verdi (brevetto REVIWALL® della società REVIPLANT). Il progetto ha visto il coinvolgimento di più organismi di ricerca e di partner industriali, la cui collaborazione ha consentito di sistematizzare e valorizzare le diverse esperienze e competenze di ognuno, attraverso un processo di condivisione di studi/sperimentazioni, di ricerche aventi come oggetto materiali e componenti riciclati o riciclabili, di database e software a disposizione degli organismi di ricerca e del know how tecnologico maturato dalle imprese coinvolte.

### **Metodologia e fasi**

Il progetto di ricerca e sviluppo industriale ha previsto le seguenti fasi fondamentali:

- selezione di materiali e prodotti;
- progettazione e produzione del prototipo;
- monitoraggio e restituzione dei risultati.

### **Selezione di materiali e prodotti**

Per orientare le successive fasi di progettazione e produzione dei prototipi, sono state condotte due tipologie di analisi, il cui risultato è stato lo sviluppo di specifiche banche dati: una relativa a "Schede Prodotti\_LWS", l'altra relativa a "Schede Materiali". La banca dati "Schede Prodotti\_LWS" è finalizzata alla comparazione delle caratteristiche dei più diffusi sistemi di parete verde presenti sul mercato. Ogni scheda prodotto è strutturata in due parti:

- Parte 1 - Dati tecnici e dati prestazionali;
- Parte 2 - Informazioni generali.

between research, design and manufacturing. Finally the efforts should be directed toward an implementation of LCA as tool to supporting the decision making. Next paragraphs describe the experience carried out in a research project called GRE\_EN\_S. In order to enhance the environmental sustainability in the construction sector, the project was based on a great involvement of several stakeholders: manufactures, designers, researchers, etc, but above all a carefully analysis of a building system over its life was carried out thus to put into effective the life cycle design criteria.

### **GRE\_EN\_S: GREen ENvelope System. A Living Wall System based on a life-cycle-approach**

Environmental effects referred to use vegetation in urban, architectural and indoor design are objective of surveys

since the beginnings of the seventies. A variety of ecological benefits can be ascribed to green façades and Living Wall Systems (LWS). Such benefits can be listed as follows: heat island effect mitigation, noise pollution insulation, heating and cooling energy demand reduction, absorption of particulate matters as well as of Volatile Organic Compounds (VOC's), enhancement of biodiversity (Weinmaster, 2009). Recently to green façades and LWS have been recognized other functions. Urban agriculture (e.g. vertical farms) may be assumed as an effective response to social needs occurred due to economical crises. Finally living walls may have a positive impact on both physical and mental health and wellbeing (Bringslimark et al., 2006). The above mentioned benefits are obviously decisive in a green façade or LWS

design but they are not enough. A green wall is built up through a large number of materials, intermediate goods (semi-finished products) and substances such as highly absorbent hydro-polymers. According to CEN/TC 350 requirements, the production planning becomes a crucial stage in order to minimise the environmental impacts and to reduce the materials intensiveness or the raw materials exploitation. Besides end-of-life design is needed since the materials must be disconnect thus to avoid a hazardous or special wastes disposal. As pointed out in some papers and articles (Bianchini and Hewage, 2012; Vila et al., 2012) it is essential to explore materials that can be replace the current use of no-renewable materials to enhance a whole environmental sustainability of vegetated building systems.

### **Aim of the research project**

Consistently to life cycle approach criteria GRE\_EN\_S (GREen Envelope System) is the acronym of a research project aimed at designing, manufacturing and monitoring a LWS, shaped by modular boxes, covered with vegetation and made up of recycled materials. In particular, the research was focused on a patented LWS re-design, in order to reduce the total amount of needed materials and semi-finished products as well as in order to improve the assembling, dismantling and maintenance stages. The research was carried out by a group of researchers led by the Department of Architecture and Design (Politecnico di Torino) along with: a leading enterprise in advanced wall systems, a nursery specialized in green façades and green roofs, a domestic small enterprise for material recycling and an

La prima parte, di tipo analitico, fornisce informazioni su parametri tecnici e prestazionali, permettendo il confronto puntuale tra specificità di sistemi diversi; la seconda, di tipo grafico, illustra la soluzione tecnologica attraverso disegni e immagini utili a una migliore comprensione delle caratteristiche formali e morfologiche. Le informazioni tecniche contenute all'interno di ciascuna scheda sono relative a: dimensioni, peso, fabbisogno idrico, numero di piante per unità di superficie, tipo di substrato, altri materiali che compongono la stratigrafia (struttura, finitura, isolamento, ecc.), luogo di produzione (Italia, Europa, extra UE).

Sulla base delle analisi condotte in fase di schedatura dei prodotti, è stata successivamente sviluppata una banca dati "Schede Materiali" (fig. 1) con l'obiettivo di individuare i materiali prestazionalmente idonei all'impiego in un sistema parete verde. Tale selezione è stata effettuata in due fasi; nella prima i materiali sono stati classificati in base all'origine, in: naturali (vegetali, animali o minerali), ceramici, polimerici, metallici, compositi; nella seconda ad ogni materiale sono state associate prestazioni di tipo meccanico, termofisico ed ecologico, selezionate in base a soglie minime.

Ogni scheda contiene, oltre alla denominazione commerciale del materiale/prodotto e dell'azienda produttrice, dati relativi a due macro-ambiti:

- tecnologico, in cui sono riportate le prestazioni di tipo meccanico, termofisico e chimico del materiale considerato;
- ambientale, in cui sono incluse informazioni relative a: *Embodied Energy* (Mj/kg), *Embodied Carbon* (kgC/kg), TVOC ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), frasi di rischio, frasi di pericolo, composizione, scenario di riciclaggio (*upcycling*, *downcycling*, *no cycling*), certificazione ambientale (se disponibile). Tali dati, che assumono come riferi-

mento lo standard LCA, sono stati integrati con informazioni di tipo quantitativo e qualitativo derivanti da prove di laboratorio, simulazioni software e dalla raccolta di dati diretti presso produttori e fornitori.

### Workshop di progettazione e di produzione del prototipo

Le analisi su prodotti e materiali hanno consentito di acquisire un'approfondita conoscenza delle soluzioni più idonee, in termini di connessioni tecnologiche e di elementi stratigrafici, per il progetto di un sistema parete verde.

Le fasi successive della ricerca hanno previsto l'organizzazione di workshop di progettazione e di realizzazione del prototipo. I workshop di progettazione hanno consentito di individuare soluzioni capaci di sostituire i materiali originariamente in uso nel pannello REVIWALL® e nella parete modulare BYBOX® e di integrare e connettere i due prodotti in un nuovo sistema a più elevato valore tecnologico e prestazionale.

La progettazione esecutiva si è concentrata su aspetti di tipo tecnologico, fisico-tecnico, agronomico e ambientale e su requisiti legati al ciclo di vita, con particolare riferimento alla dematerializzazione, al disassemblaggio, all'ottimizzazione della vita utile dei prodotti e alle relative procedure di smaltimento.

L'approccio legato al ciclo di vita è stato adottato nello specifico per i seguenti strati:

- strato di accrescimento delle piante: costituito da scarti di produzione di feltrini sottosedea sminuzzati e fibra di cocco, in percentuali variabili (dal 50% al 100%);
- strato isolante: realizzato attraverso l'assemblaggio di scarti della lavorazione di solette in sughero per scarpe;

enterprise producing geo-textiles and felts for building constructions.

#### Methodology and phases

The paper deal with the outcomes and the outlooks of a research methodology based on the following tasks: LWS's featuring (available on the market), material sorting, designing meetings, prototyping workshops and monitoring activities.

#### LWS's featuring and material sorting

In order to make possible a proper design and manufacturing of GRE\_EN\_S LWS a comparative analysis among several LWS's was carried out.

Several parameters were set up and collected in "product\_datasheets".

Every "product\_datasheet" was divided in two-parts:

- Part 1 - Technical data and performance data;

WOOL FELT (0 Km wool)		ENVIRONMENTAL Characterization		PERFORMANCE Characterization		
	Embodied Energy $\text{MJ}/\text{kg}$	PR	2.54	1-101	Structure	Fiber
		RE	64.81	3.48	Shape and Form	roll and piece of cloth
	Embodied Carbon $\text{kgC}/\text{kg}$	Material	0.002	3.000	Density $\rho_{app}$	-
		RE	0.748	0.27	Compression strength	-
	Toxicity			0%	Elastic limit	-
	TVOC emission factor $\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$			-100	Specific heat $C_s$	1300 - 1700
	R phrases			None	Thermal Conductivity $\lambda_{app}$	0.037 - 0.044
	H phrases			None	Water vapour resistance factor $\mu$	1 - 5
	Composition			100% raw wool	Fire class	F
	Recycling scenarios			biodegradable downcycling special waste	Strong Acid resistance	Average
Supplier Information		Environmental labels		Strong Alkali resistance		
Manufacturer	Davill	None		UV resistance		
Distributor	Davill			Average		
Contact	www.davill.it					

01 | Esempio di scheda materiali elaborata dal gruppo di ricerca DAD

Example of a material card compiled by DAD



02 | Prototipo del sistema parete GRE\_EN\_S, foto di Elena Montacchini  
GRE\_EN\_S prototipo; photo by Elena Montacchini

03 | Schema del sistema parete GRE\_EN\_S, disegno del gruppo di ricerca DAD  
Isometric of GRE\_EN\_S assembly; sketch by DAD



– strato di protezione: realizzato attraverso l’abbinamento di un feltro in PE e viscosa, in grado di ridurre lo spessore e il peso della parete verde.

Complessivamente sono stati realizzati tre progetti esecutivi, che hanno portato alla realizzazione di rispettivi prototipi, successivamente testati e monitorati.

Analoga modalità workshop è stata adottata per realizzare i prototipi. La scelta di avvalersi delle competenze di ciascun partner e delle sinergie derivanti dalla collaborazione interdisciplinare si è dimostrata la metodologia ottimale per verificare le prestazioni dei prototipi (valutazione dell’idoneità dei materiali, dell’adeguatezza delle connessioni, della facilità di montaggio, ecc.). In funzione della durata limitata del progetto (36 mesi) e della necessità di testare il sistema attraverso successivi monitoraggi, sono stati realizzati complessivamente tre prototipi.

- Part 2 – General information.

Part 1 provides information about technical featuring, materials and product performances. Data functional at the comparison among different systems were collected. This part can be assumed as the “core” of the datasheet.

Part 2 takes account of information related to architectural design solutions, detailed drawings as well as pictures taken from selected buildings. Such information are useful for a better understanding of formal and morphological aspects.

Other technical data included in the “product\_datasheets” are summarised as follows:

- Materials: the record was split up in two according to main layers featuring a LWS; the former concerns the soil and the plants; the latter concerns the stud-frame and materials aimed at insulating and finishing the LWS itself;

- Location: the record provides information about the manufacturing site (Italy, Europe and non EU Countries). Material sorting was the further task based on the knowledge achieved with LWS’s featuring. The sorting was divided in two activities. The former was carried out according to materials’ source encompassing: natural fibres and materials (plants, animals and minerals), glass and ceramic materials, polymeric fibres and materials, metallic materials and composite materials.

The latter was achieved focusing the research on mechanical, thermals as well as ecological selection criteria. Some attributes (e.g. UV resistance, U-value, etc.) were selected in a predetermined range of values. The range of value was a crucial phase within the material sorting since it allowed to sifting-out those materials unsuitable to be used in GRE\_EN\_S LWS.

Il prototipo definitivo, realizzato con Lonicera nitida, è costituito da una struttura di supporto in alluminio, una geogriglia interna per l’ancoraggio dell’apparato radicale e una serie di strati in feltro, di diversi materiali, per il rivestimento del pannello, la sua protezione e l’alloggiamento delle specie vegetali (figg. 2 e 3). In aggiunta all’aumento di stabilità geometrica e di resistenza meccanica rispetto al pannello modulare REVIWALL®, è stata notevolmente migliorata la modalità di assemblaggio, diminuendo il numero di operazioni manuali.

### Monitoraggio e risultati

In aggiunta alla valutazione congiunta di aspetti legati alla selezione dei materiali, al sistema di produzione e assemblaggio e alle modalità di dismissione e riciclo, il progetto ha posto particolare attenzione anche alla valutazione delle prestazioni in fase di esercizio, determinanti per la competitività sul mercato di un sistema parete verde. Sono state monitorate le prestazioni tecnologiche, agronomiche, termiche, acustiche e di qualità dell’aria (in accordo con gli scenari previsti dalla CEN/TC 350), nel periodo compreso tra gennaio 2011 e aprile 2013.

In fase di esercizio il monitoraggio è stato condotto attraverso due modalità:

– in apposite celle di prova in condizioni ambientali controllate (fig. 4);

– in un edificio campione, suddiviso in due blocchi indipendenti, uno realizzato con il sistema parete GRE\_EN\_S, l’altro con tipiche tecnologie di rivestimento leggere.

Nello specifico, il rilevamento dei dati nelle celle di prova e l’analisi dei risultati ha previsto la valutazione di:

– prestazioni agronomiche, individuando nell’indice LAI (Leaf

The “material cards” (see fig. 1) can be assumed as main outcome of materials sorting activities. Every “material card” is divided in three tags:

- Tag-material 1. It provides basic commercial information (countries of origin, availability on local market, etc);

- Tag-material 2. It provides environmental information (embodied energy, embodied carbon, toxicity, recycling scenario, environmental labelling if available, etc.);

- Tag-material 3. It provides technological information (mechanical, thermal and chemical properties).

Environmental data were characterised assuming as reference the LCA standard. The LCA methodology was integrated with numerical and non numerical information achieved by means of mailing and phone interviews with manufacturers and LWS experts, laboratory analysis and software modelling as well.

### Designing meetings and prototyping workshops

Product datasheet and materials sorting provide both a broad knowledge about the technological connections as well as the suitable materials to be used in GRE\_EN\_S LWS.

Designing meetings started by a wall system re-design. A couple of patented systems were chosen: Reviwall® and Bybox®. Reviwall® is self standing vegetative cover. It is mainly used for indoor ornamental purposes. Bybox® is a light-weight wall system. Initially Reviwall® and Bybox® were two systems unfitted to be connected in whole building system. Detailed design focused its attention both to thermal, agronomical and air-quality properties and to life cycle requirements, with regards to material intensiveness, connections among layers and materials, materials lifespan, etc. In order to match different proper-

Chamber test for GRE\_EN\_S LWS thermal monitoring (on the left) and IAQ monitoring (on the right); photo by Silvia Tedesco



Area Index) il parametro fondamentale per correlare variabili energetiche e ambientali. Infatti la superficie fogliare influenza sia le capacità termiche della parete sia le potenzialità di diluizione di inquinanti dell'aria. Gli scarti di produzione di feltrini sottosedia sminuzzati, all'interno del substrato, hanno consentito un migliore sviluppo dell'apparato aereo, aumentando il numero di foglie e la superficie fogliare (Bianco et al., 2012);

- prestazioni energetiche, relativamente alla misura delle temperature superficiali e dei flussi termici. I risultati finora ottenuti dimostrano l'efficienza del sistema parete sia durante la stagione invernale sia durante quella estiva. Ad esempio, in una giornata tipo invernale e nuvolosa, il sistema parete GRE\_EN\_S riduce le perdite di calore del 56% rispetto ad una parete di benchmark, realizzata con un sistema a cappotto tradizionale e con un equivalente valore di trasmittanza teorica. Inoltre, rispetto al substrato utilizzato nel pannello modulare RE-VIWALL®, quello utilizzato nel pannello GRE\_EN\_S consente di ridurre la trasmittanza del pacchetto tecnologico (Bianco et al., 2012);

ties each decision was the outcome of technical advices provided by research's partners and experts attending at design meetings.

Consistently to a life cycle approach, priority was given to following materials:

- growing medium: felt-pad wastes were added to the coconut peat in several percentages (50% up to 100%) as alternative growth-media material;
- insulation layer: assembled board made of recycled and overlapped industrial residues of cork-insoles were proposed as insulation material;
- nonwoven fabrics: combined materials made with a polyester felt and viscose were chosen to reduce LWS weight and thickness.

The replacement in the LWS of permanent connections with reversible ones was a further goal set up in the design meetings.

Altogether three LWS's detailed designs were carried out. Every design was manufactured and subsequently tested and monitored. To get a quickly technological assessment a couple of prototyping workshops were arranged. Such workshops allowed GRE\_EN\_S's partners to assess if the selected materials were really suitable to expected functions and if designed connections were easy-assembling.

The number of prototypes manufactured was three. Such number is dependent on the one hand on the time available (36 months) and on the one other on the monitoring results.

The third prototype, covered with *Lonicera nitida*, was made up as follows: frame of galvanized aluminium; double geogrid for roots anchorage; growing medium; two layers of rootable nonwoven synthetic fabrics (polyester and viscose).

- prestazioni acustiche, attraverso la valutazione del coefficiente di assorbimento acustico. Dai risultati ottenuti emerge che il sistema GRE\_EN\_S ha un elevato coefficiente di assorbimento acustico, soprattutto alle medie e alte frequenze. I valori misurati sono infatti paragonabili a materiali altamente fonoassorbenti, quali la lana di roccia;

- qualità dell'aria, in relazione alla capacità di abbattimento di VOC. I risultati conseguiti allo stato attuale evidenziano la tendenza alla diluizione dei TVOC, sebbene non siano ancora disponibili risultati specifici sulle potenzialità di riduzione della concentrazione di singoli composti organici volatili.

Il monitoraggio delle succitate prestazioni nell'edificio campione è tuttora in corso.

Maggiori informazioni sui risultati dei monitoraggi, in termini quantitativi, non sono al momento divulgabili per ragioni di riservatezza. Dati sensibili derivanti da una ricerca industriale e di sviluppo sperimentale, come quella descritta nel presente articolo, sono infatti da tutelare fino alla conclusione del progetto, all'eventuale deposito della domanda di brevetto e/o all'industrializzazione del sistema.

## Conclusioni e prospettive

Sebbene siano ancora limitati i progetti di sviluppo e sperimentazione industriale in cui vengono presi in considerazione tutti gli impatti di un prodotto nelle diverse fasi del suo ciclo di vita, l'esperienza maturata nel progetto GRE\_EN\_S dimostra quali possano essere le potenzialità innescate dalla sinergia progettazione esecutiva, produzione edilizia e valutazione sistemica.

Il progetto di ricerca GRE\_EN\_S ha messo in evidenza come l'applicazione nell'intero processo decisionale della metodologia

The frame of galvanized aluminium was used in order to keep stable and to avoid bending during either the construction or the maintenance or, eventually, if a substitutions might be occurred. Such technological solution allows a dramatically minimization in the manual operations (figg. 2-3).

## Monitoring activities

Correlation among material selections, system manufacturing and recycling was carefully taken into account in the previews described phases. Obviously the market competitiveness of a LWS entails an operational stage assessment. Energy performance, agronomical behaviour, sound insulation properties as well as plants VOC's absorption were monitored (according to CEN/TC 350 scenario) in a chamber test built up immediately after the first prototype production. The cham-

ber south façade was built up with two technological systems. The former with GRE\_EN\_S LWS; the latter with conventional plastered wall (benchmark). The same theoretical u-value was assumed as reference (fig. 4).

Afterwards a modular installation was built in order to let a further monitoring and test (fig. 5).

The test period was carried out between January 2011 and April 2013.

The GRE\_EN\_S LWS effectiveness was demonstrated by the capability of leaves to reduce heating losses. For instance in a typical winter cloudy day the calculation of total daily energy loss shows that GRE\_E\_S LWS can reduce the heating losses somewhere about 56% if compared with the benchmark (Bianco et al. 2012).

The conductance measured by the sensors (thermocouples) positioned behind the GRE\_EN\_S LWS shows



05 | I due blocchi dell'edificio campione,  
foto di Fabio Marzano  
Modular installation with GRE\_EN\_S LWS;  
photo by Fabio Marzano

LCA, dalla scelta dei materiali, alle modalità di assemblaggio, fino alla fase di esercizio e fine vita, consenta di migliorare le prestazioni tecnologiche e ambientali del sistema.

Come richiamato nell'articolo, la stretta collaborazione tra gli attori del processo edilizio è la chiave di volta per implementare la competitività nel settore edilizio, migliorare le competenze professionali, condividere gli obiettivi di sostenibilità ambientale e rendere operative le strategie della progettazione ecocompatibile.

### Ringraziamenti

La ricerca è stata sviluppata nell'ambito di un progetto finanziato dalla Regione Piemonte su Fondi Europei per lo Sviluppo Regionale (POR-FESR 2007-2013). Il Dipartimento di Architettura e Design (DAD) del Politecnico di Torino ringrazia i partner di ricerca – il Dipartimento Energia (DENERG) del Politecnico di Torino, il Dipartimento di Agraria dell'Università degli Studi di Torino (AGRO.SEL.VITER) – e i partner industriali – CEIT, REVIPLANT, 13 RICREA, SAFI-TECH – per la preziosa collaborazione, per il know how e le strumentazioni condivise. Uno speciale ringraziamento all'arch. Gabriele Druetta per il supporto in tutte le fasi della ricerca e a Environment Park per la disponibilità ad ospitare nel proprio sito l'edificio campione.

that in a comparison with conventional Revivall® made up with standard growing medium, the latter has a higher conductivity value. This may be due by two effects: the felt-pads property to improve the LWS insulation and/or the higher reduction of surface heat exchange coefficients.

With regards to agronomical featuring the results of leaf area measurements shows that felt pad does not reduce both the leaf numbers and the leaf area. Nonetheless the reduction of growth media the felt pads increase the aerial part of the plants.

Indoor air quality test shows the plants ability to remove VOCs. The test was carried out for several days in a non-ventilated test chamber. A chamber facade was covered with plants and afterward the plants were removed. Dioxide carbon and TVOC's were detected. The data collected proved a

higher TVOC's removal efficiency if chamber has plants.

More information on monitoring results are not currently disclosed for reasons of confidentiality. Sensitive data resulting from industrial research and experimental development, as described in this article, need to be protected until the project conclusion in order to allow the patent deposit and/or the industrialization of the LWS.

### Conclusion and outlook

As described in the paper a comprehensive assessment of building life cycle is still characterised of open issues difficult to be overcome soon. Nevertheless the paper demonstrates that a "step-forward" was carried out.

In the project LCA was essential for the materials selection although it is still a time consuming methods and it still requires expertises in the data inter-

### REFERENCES

- Bianchini, F. e Hewage, K. (2012), "How 'green' are the green roofs? Life cycle analysis of green roof materials", *Building and Environment*, Vol. 48, pp. 57-65.
- Bianco, L., Serra, V., Larcher, F. e Perino, M. (2012), "Experimental assessment of a green wall modular system: effects on heat transfer and on surface temperature control", in *Proceedings of the 5th IBPC*, Kyoto, Japan, pp. 417-423.
- Bringslimark, T., Hartig, T. e Patil, G. (2006), "The associations between indoor plants and perceived stress, sick leave and performance", in *Proceedings of the 26th International Horticultural Congress*, Seoul, Korea, pp. 117-121.
- Giordano, R. (2010), *I prodotti per l'edilizia sostenibile*, Sistemi Editoriali, Napoli.
- Keoleian, G.A. e Menerey, D. (1993), *Life Cycle Design Guidance Manual: environmental requirements and the product system*, Cincinnati, OH.
- San-Josè Lombera, J.-T. e Cuadrado Rojo, J. (2010), "Industrial building design stage based on a system approach to their environmental sustainability", *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 438-447.
- Vila, A., Pérez, G., Solé, C., Fernández, A.I. e Cabeza, L.F. (2012), "Use of rubber crumbs as drainage layer in experimental green roofs", *Building and Environment*, Vol. 48, pp. 101-106.
- Weinmaster, M. (2009), "Are green walls as 'green' as they look? An Introduction to the various Technologies and ecological benefits of green walls", *Journal of Green Building*, Vol. 4, No. 4, pp. 3-18.

pretation. Low cost and user-friendly database and software should be soon developed in order to enable a broad use of LCA.

As highlighted in the paper a close cooperation among stakeholders is a key-issue to be encouraged in the construction sector. In the future such cooperation may increase the awareness on sustainability, it may carry in effect the environmental design strategies and it may improve the skill and the qualification.

### Acknowledgments

GRE\_EN\_S was financed by Piedmont Region through the European Regional Development Fund (ERDF 2007-2013).

Department of Architecture and Design of Politecnico di Torino are acknowledged for the equipments used in the experiments and the close coop-

eration with the Department of Agronomy and Selviculture of University of Turin and the Department of Energy of Politecnico di Torino.

The authors wish to thanks CEIT a leader enterprise in lightweight building systems for its participation in design meetings and manufacturing workshops.

Material sorting and the prototyping workshops were carried out with the precious help of 13 RICREA, experts in material recycling, and SAFI-TECH, specialised in fabrics and geo-textile manufacturing.

Mr Secondino Lamparelli is acknowledged for his contributes in plants nursing.

Finally special thanks go to Arch. Gabriele Druetta for his support in all research phases and to Environment Park for hosting the modular installation in its site.