

Francesca Thiébat, Dipartimento Architettura e Design, Politecnico di Torino

francesca.thiebat@polito.it

Abstract. In architettura il concetto di sostenibilità è strettamente legato agli aspetti ambientali e sociali, ma anche agli aspetti economici di un progetto. Di solito, per un team di progettazione il costo di un edificio rappresenta un vincolo imprescindibile rispetto al suo grado di qualità ambientale. In quest'ottica, come fare a spingere committenti e imprese a introdurre sul mercato edifici che considerino l'aspetto sociale, che rispettino i vincoli economici e che, contemporaneamente, non compromettano la sfera ambientale?

L'articolo intende mostrare uno strumento, indirizzato a progettisti e committenti pubblici o privati, da applicare alla progettazione edilizia per valutare la sostenibilità globale di un edificio secondo le tre prospettive, ambientale, economica e sociale, considerando l'intero ciclo di vita.

Lo sviluppo di strumenti da applicare nel processo progettuale, a scala di edificio, che si basano sull'analisi dell'intero ciclo di vita rende possibile la concretizzazione di un'architettura integrata e sostenibile. La ricerca presentata, che ha come oggetto la messa a punto di uno strumento che combina metodi in ottica *Life Cycle Thinking*, si inserisce all'interno del sistema progettuale rappresentando un'evoluzione del concetto di qualità, così come definita nel secolo scorso dal *Project Management* attraverso la teoria *time-cost-quality triangle*. Ai tradizionali tempo, costo e qualità si includono "ambiente", "società" e "valore estetico".

Parole chiave: Architettura, Sostenibilità, Qualità, Life Cycle Assessment, Life Cycle Costing

Il mio concetto di «architettura» è nell'unione e nella collaborazione delle arti, in modo che ogni cosa sia subordinata alle altre e con esse in armonia, e quando userò tale parola, questo sarà il significato, non uno più ristretto. (William Morris, 1881)

Introduzione

«L'architettura cosciente, a differenza della costruzione spontanea, dovrebbe essere in grado di fornire in modo razionale soluzioni particolari a problemi specifici» (Banham, 1969). È il 1969 quando Reyner Banham evidenzia che, dalla rivoluzione industriale in avanti, molteplici parametri sono entrati in gioco nel nuovo processo progettuale e concorrono alla qualità ambientale dell'edificio. «Sarebbe stato chiaro da molto tempo che l'arte e la professione del costruire non possono essere se-

parate in due entità intellettualmente distinte – *strutture architettoniche*, da una parte, e dall'altra *servizi meccanici*» (Banham, 1969).

A favore di una progettazione più integrata si evidenziano due importanti fenomeni avvenuti nel secolo scorso. Il primo è rappresentato dall'introduzione del termine «sostenibilità» nel 1987¹, inizialmente applicato ai grandi temi di scala globale e poi associato a politiche nazionali e locali² anche al mondo dell'edilizia (Haapio e Viitaniemi, 2008), settore, in Europa, maggior responsabile dei consumi di energia primaria con un valore di 39% (Saheb, 2012)³.

Il secondo fenomeno è rappresentato dal cambiamento di organizzazione degli studi di progettazione che ha come obiettivo principale la 'qualità' del processo. Dagli anni '50 del Novecento si inizia a ripensare la struttura di progettazione che deve guidare un processo sempre più complesso, che inizia dal progetto e continua per tutto il ciclo di vita del prodotto (edificio o componente edilizio). L'obiettivo è di ridurre i tempi di realizzazione e di mantenere inalterati i costi di costruzione e manutenzione

pianificati per le opere, in modo da ottimizzare gli investimenti e dominare le crisi economiche e l'inflazione (Ciribini, 1984). Si applica l'approccio alla progettazione definito dal *Project Management* che si fonda sul concetto di qualità secondo lo schema del *time-cost-quality triangle* o *iron triangle* (PMBOK Guide, 2008) (Fig.1). In campo architettonico, il concetto di sostenibilità insieme con quello di qualità costituisce l'obiettivo comune di ciascuna azione specialistica che rientra nel processo progettuale. Il raggiungimento di tali obiettivi potrebbe allora rappresentare il fine di una progettazione integrata (Fig. 1).

Life-cycle design for sustainable architecture

Abstract: Sustainability in architecture should involve environmental and social aspects and also economic aspects.

However, in a design process budget issues usually outweigh ecological aspects. How can we then drive clients and builders to put more socially responsible buildings on the market that do not exceed the fixed budget but are environmentally friendly?

This paper propose an economic and environmental assessment tool to aid private or public building designers and owners to find the global sustainability value of a green building within a life cycle perspective.

Sustainable life cycle tools for buildings design and construction help to achieve successfully integrated architecture. The research here presented proposes a new point of view of the "time-cost-quality triangle" of Project Management, by introducing three further aspects: environment, society and aesthetics.

Keywords: Architecture, Sustainability, Quality, Life Cycle Assessment, Life Cycle Costing

It is this union of the arts, mutually helpful and harmoniously subordinated one to another, which I have learned to think of as Architecture, and when I use the word to-night, that is what I shall mean by it and nothing narrower. (William Morris, 1881)

Introduction

«Conscious architecture, as distinguished from vernacular building, should be able to reason out the unique solutions to specific problems» (Banham, 1969).

In 1969, in his classic *The Architecture of the Well Tempered Environment*, Reyner Banham pointed out that since the Industrial revolution a number of new parameters entered

the design process, concurring to the environmental quality of buildings.

«It would be apparent long ago that the art and business of creating buildings is not divisible into two intellectually separated parts – *structures*, on the one hand, and on the other *mechanical services*» (Banham, 1969).

In the 20th Century integrated design was favored by two important developments. The first was the introduction of the term 'sustainability' in 1987¹. While initially it was used to define great issues on a global scale, it was later linked to national and local politics² and to the world of construction (Haapio and Viitaniemi, 2008). In Europe, the building sector is responsible for 39% of the total primary energy consumption (Saheb, 2012)³. The second development was a change in the organization of design firms, whose major goal is the 'quality' of the



Occorre ancora evidenziare un elemento critico che si genera parlando di qualità e sostenibilità nel processo architettonico: la relazione con il concetto di architettura. Il dizionario della lingua italiana Devoto-Oli definisce l'«architettura» una «elaborazione artistica degli elementi strutturali, funzionali ed estetici della costruzione». Il termine è di origine greca, ἀρχιτέκτων, 'capo costruttore' (Devoto e Oli, 2000). In *De Architettura* Vitruvio definisce i tre requisiti essenziali di ogni architettura: *Utilitas* (utilità nella funzione), *Firmitas* (solidità nella statica e nei materiali) e *Venustas* (venustà, bellezza, estetica).

Il processo di progettazione architettonica sostenibile potrebbe essere rappresentato dall'evoluzione dell'*Iron Triangle* includendo tre altri aspetti (Fig. 2): ai tradizionali tempo, costo e qualità si potrebbero, infatti, aggiungere "ambiente", "società" e "valore estetico".



process. This rethinking of the organization of the design work began in the Fifties, driven by the need to guide an ever more complex process, which begins at design stage and goes on for the whole life cycle of the product (building or component). The final goal is to reduce contract time while keeping construction and maintenance costs unchanged, thus allowing the optimization of investments and limiting the effects of recessions and inflation (Ciribini, 1984). *Project Management* defines the design approach, which is based on the *time-cost-quality triangle* or *iron triangle* (PMBOK Guide 2008) (Fig. 1). In *architecture sustainability and quality* are the common goals of each individual step in the design process. Meeting these goals is the aim of integrated design (Fig. 1).

It is necessary to highlight a further critical aspect which arises from the

discussion about the quality and sustainability of the architectural process, namely its relationship with the very concept of architecture.

Analyzing the term «architecture», it is defined as the «artistic processing of structural, functional and aesthetic elements of a construction» (Devoto and Oli, 2000). The term has Greek origins, ἀρχιτέκτων, that means 'builder chief'. Historically, in *De Architettura* the Roman architect Vitruvio consider that architecture should have three qualities: *Utilitas* (functional utility), *Firmitas* (solidity) and *Venustas* (beauty and aesthetics). A sustainable design approach in architecture can be describes as an evolution of the iron triangle which includes the three further aspects of environment, society and aesthetics (Fig. 2).

Valutazione del ciclo di vita per la progettazione architettonica

Allo strumento che possa facilitare i progettisti e indirizzare tutti gli attori coinvolti nel processo verso una progettazione sostenibile, come suggerisce il crescente interesse verso sistemi più comprensibili e semplificati (Mateus e Bragança, 2011). Il presente studio non intende essere esaustivo, ma propone un punto di partenza per lo sviluppo futuro di uno strumento più definito e completo coerente con linee guida del *Life Cycle Sustainable Assessment* (Valdivia et al., 2011), come in seguito esaminato.

Futuri sviluppi del metodo dovranno includere l'impatto sulla società e il valore estetico, che richiedono una valutazione più complessa per le loro caratteristiche intrinseche di soggettività. A questo livello il metodo potrebbe evolvere a strumento globale di critica architettonica capace di superare i limiti della critica tradizionale basata su criteri da storia dell'arte.

Il settore delle costruzioni dagli anni '90 ha preso coscienza dell'impatto provocato dalla propria attività nei confronti dell'ambiente e ha iniziato a orientarsi verso i temi della sostenibilità focalizzando l'attenzione sui modi di progettazione, costruzione e gestione degli edifici (Haapio e Viitaniemi, 2008).

Life-cycle assessment for sustainable architecture

Starting from the complexity of concepts like "architecture" and "sustainability", the research here presented aims at developing a tool that can guide designers and stakeholders toward a sustainable design, in line with the growing interest for user-friendly and simplified systems (Mateus and Bragança, 2011). The study does not pretend to be exhaustive, but it would suggest a starting point for the future development of a more defined and comprehensive tool in line with the *Life Cycle Sustainable Assessment* guidelines (Valdivia et al., 2011) as will be discussed below. Future developments of the method described shall include the impact on society and the aesthetic value, which require a more complex evaluation due to their subjective nature. At this stage the method would evolve from simple

evaluation tool to the level of all-around architectural criticism, thus surpassing the kind of limited art history criticism on which most architectural history is traditionally based.

From the 1990s building sector started to recognize the impact of its activity on the environment and focused on how buildings has to be designed, built and operated (Haapio and Viitaniemi, 2008). The development of environmental impact indicators and the raise of assessment methods and tools carried on by prime research organizations, become a leading topic at international congresses and a challenge also for architects, clients and builders (Mateus and Bragança, 2011). In the last two decades, the normative system has made great advances on the issue of building sustainability assessment with the effort of all levels of standardization committees, the Inter-

Lo sviluppo di indicatori ambientali e di strumenti di valutazione, portato avanti dai maggiori enti di ricerca, è diventato il focus principale di dibattiti internazionali e, oggi, rappresenta una sfida anche per i soggetti direttamente coinvolti nel processo costruttivo, architetti, committenti e costruttori (Mateus e Brançã, 2011).

In ambito normativo, il tema della valutazione della sostenibilità degli edifici è stato, nell'ultimo ventennio, oggetto di sviluppo da parte dell'ISO, del CEN e in Italia dell'UNI. In Europa, l'attività del CEN/TC 350 (Sostenibilità in Edilizia) attraverso diversi gruppi di lavoro ha sviluppato alcune norme sia a livello di prodotto e sia a livello dell'edificio. In particolare, le norme pubblicate a scala di edificio, la serie UNI EN 15643 e la UNI EN 15978 «Sostenibilità delle costruzioni», costituiscono uno strumento di verifica della sostenibilità degli edifici e si basano sull'approccio *life cycle* (Grosso, 2011). Parallelamente in Italia l'attività del gruppo di lavoro UNI «Sostenibilità in edilizia», della Commissione «Prodotti, processi e sistemi per l'organismo edilizio», sta uniformando il quadro di riferimento delle fasi del ciclo di vita con quello stabilito dalla commissione tecnica europea e illustrato nelle norme precedentemente citate (Peretti e Thiébat, 2012).

Lo slogan «dalla culla alla tomba» che identifica l'approccio *Life Cycle Thinking* è stato applicato per la prima volta a valutazioni ambientali di prodotto negli Stati Uniti alla fine degli anni '60, soprattutto con il supporto di grandi aziende e dell'EPA (*Environmental Protection Agency*). Nel 1998 viene pubblicata la prima norma della serie ISO 14040/44 sull'*Environmental Management – Life Cycle Assessment*.

A partire da quel momento nascono diversi tentativi di inte-

national ISO, the European CEN and the local ones (i.e. UNI in Italy). The European Technical Committee CEN/TC 350 developed standards to assess the sustainability of construction and products. Specifically UNI EN 15643 (part 1, 2, 3 and 4) and UNI EN 15978 «Sustainability of construction works», point out frameworks and methods to evaluate the sustainability of a building, in term of environment, economic and social performances, through a life cycle approach (Grosso, 2011). The Italian Technical Commission «*Prodotti, processi e sistemi per l'organismo edilizio*» is working on the same building life cycle stages in order to ensure the consistency between the results of the European Technical Committee CEN/TC 350 and the ones achieved by UNI «*Sostenibilità in edilizia*» (Peretti and Thiébat, 2012). The slogan «from cradle to grave» of Life Cycle Thinking approach, was adopted

firstly in the 1960s in the United States for environmental assessments in conjunction with industry and EPA (*Environmental Protection Agency*) and in 1998 was published the first standard of series ISO 14040/44 «*Environmental Management – Life Cycle Assessment*». From that time, several methods start to combine sustainability principles into LCA, aiming at integrating life cycle approach into sustainable assessment. However, only in 2011 the United Nations Environment Programme (UNEP) has been formalized that into the LCSA, *Life Cycle Sustainable Assessment Framework* (Klöpffer, 2008; Valdivia et al., 2011), where LCA is combined with Life Cycle Costing and Social Life Cycle Assessment.

€CO life cycle evaluation tool

Moving from those premises, the research is centered on the develop-

ment of a methodology to evaluate the economic-environmental efficiency of buildings and building components. In order to work out and validate the tool three significant studies, based on life cycle, have been analyzed:

- the Environmental LLC developed from the SETAC workgroup since 2003 (Hunkeler, Lichtenvort and Rebitzer, 2008);
- the Life Cycle Costing defined by the ISO 15686-5: 2008, based on the results of the ISO/TC/59/SC 14 started in 1997;
- the Life Cycle Assessment defined by the ISO 14040/44:2006, based on the results of the ISO/TC 207/SC 5 started in 1993.

Modello di valutazione del ciclo di vita €CO

Prendendo il via da questi presupposti, la ricerca si è incentrata sullo sviluppo di una metodologia di valutazione per determinare l'efficienza economico-ambientale di edifici o componenti edilizi, basandosi su alcuni studi recenti che hanno analizzato i tre temi della sostenibilità. In particolare si citano:

- l'*Environmental LCC* sviluppato dal gruppo di lavoro del SETAC a partire dal 2003 (Hunkeler, Lichtenvort e Rebitzer, 2008);
- il *Life Cycle Costing* definito dalla norma ISO 15686-5:2008 che si basa sui risultati dall'attività dell'ISO/TC 59/SC 14 iniziata nel 1997;
- il *Life Cycle Assessment* definito dalle norme ISO 14040/44:2006 che si basano sui risultati dall'attività dell'ISO/TC 207/SC 5 iniziata nel 1993.

Il modello, seguendo le recenti tendenze internazionali (Klöpffer, 2008; Hunkeler, Lichtenvort e Rebitzer, 2008; Swarr et al., 2011; Valdivia et al., 2011), utilizza la struttura a quattro fasi definita dall'ISO14040 per valutare sia gli aspetti ambientali (con l'analisi LCA) sia economici (con l'analisi LCC) di uno o più soluzioni progettuali:

ment of a methodology to evaluate the economic-environmental efficiency of buildings and building components. In order to work out and validate the tool three significant studies, based on life cycle, have been analyzed:

- the Environmental LLC developed from the SETAC workgroup since 2003 (Hunkeler, Lichtenvort and Rebitzer, 2008);
- the Life Cycle Costing defined by the ISO 15686-5: 2008, based on the results of the ISO/TC/59/SC 14 started in 1997;
- the Life Cycle Assessment defined by the ISO 14040/44:2006, based on the results of the ISO/TC 207/SC 5 started in 1993.

The model, following the recent international trends (Klopffer 2008, Hunkeler Lichtenvort and Rebitzer 2008, Swarr et al. 2011, Valdivia et al., 2011), adopts the four-phases structure defined by ISO 14040 to evaluate both environmental (through LCA analysis) and economi-

cal aspects (through LCC method). The mentioned phases are listed here:

- 1 - Goal and scope definition.
- 2 - Life Cycle Inventory analysis – LCI.
- 3 - Life Cycle Impact Assessment – LCIA.
- 4 - Life Cycle Interpretation.

LCA is characterized by an 'open' frame which allows the user to locate and define the system borders and the functional unit basing on the specific target of the analysis. This peculiarity is functional to the main goals of this research because it allows, on one hand, to implement the number of possible applications favoring the use of the method in a clear and simplified way (borders more or less extended) and, on the other hand, to adapt the method to the user needs (choice of the functional unit on the basis of the performance needed). For instance, the assumed number of years in the life cycle of a building can change according to geography or intended use.

1 – Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione.

2 – Analisi di inventario.

3 – Valutazione degli impatti.

4 – Interpretazione.

Una struttura 'aperta' come quella dell'LCA permette di individuare e definire specifici confini del sistema e unità funzionale in base all'obiettivo dell'analisi. Questo consente un utilizzo del metodo più semplificato, chiaro e intuitivo (confini del sistema più o meno estesi) e il rispetto delle esigenze dell'utente (scelta dell'unità funzionale in base al tipo di prestazione da soddisfare), obiettivi principali della ricerca. Ad esempio, l'assunzione del numero di anni di vita utile di un edificio può cambiare in base al contesto geografico o alla destinazione d'uso, analogamente l'unità funzionale varierà se l'analisi è condotta su un singolo componente o elemento tecnico (chiusura verticale, copertura, involucro trasparente, ecc.) o sull'edificio intero, oppure in base al livello prestazionale richiesto da soddisfare con scelte tecnologiche e architettoniche specifiche (inerzia termica, trasmittanza termica, ecc.).

Indicatori economici e ambientali

Attraverso l'analisi di inventario si quantificano i flussi in entrata e in uscita del sistema, riguardo ai processi che avvengono nelle varie fasi del ciclo di vita. I dati possono essere diretti o indiretti e riguardano gli scambi di materia e di energia. Allo stesso modo, si aggiungono i flussi concernenti i costi che possono essere tratti da prezziari, dalla letteratura o dal contatto diretto con le aziende.

La fase successiva è rappresentata dall'analisi degli impatti che è finalizzata alla valutazione della portata dei potenziali impatti

In the same way the functional unit will vary if the analysis is run on a single component (wall, roof, glazing façade, etc.) or on the whole building or on the basis of the performance level required which must be reached through specific technological and architectural choices (thermal mass, thermal transmittance, etc.).

Economic and environmental indicators

Inputs and outputs flows of the system are quantified through the Inventory Analysis, in relation to all the processes taking place in the various phases of the life cycle. Data can be direct or indirect and concern matter and energy exchanges. In the same way direct or indirect costs flows are added, extracted from price lists, public knowledge, or directly from suppliers.

A further phase is the Life Cycle Impacts

Analysis where potential environmental impacts are evaluated through selected indicators. This study focused on two environmental indicators which estimate effects at global scale:

- global Warming Potential (GWP). Potential quantity of greenhouse gases released;

- gross Energy Requirement (GER). Primary energy required to produce a product which must be extracted from nature.

The economic impact is measured through the calculation of Life Cycle Cost (LCC): cost of a building or parts of it throughout its life cycle, while fulfilling the performance requirements, including costs of construction, operation, maintenance and end-of-life (ISO 15686-5:2008).

The comparison of the results obtained at this stage represent the objective first level of evaluation, even if they are

ambientali, attraverso indicatori scelti. Lo studio si è concentrato su due indicatori che stimano effetti ambientali a scala globale:

– Il *Global Warming Potential* (GWP). Quantitativo potenziale dei principali gas che provocano l'effetto serra;

– il *Gross Energy Requirement* (GER). Energia primaria complessiva, richiesta per la produzione di un prodotto, che deve essere prelevata dalla natura.

L'impatto economico si misura attraverso il calcolo del Costo del Ciclo di Vita (LCC). Costo da sostenere per soddisfare specifici requisiti prestazionali di un edificio o parti di esso, nel suo arco di vita, che include i costi di costruzione, uso, manutenzione e dismissione (ISO 15686-5:2008).

Il confronto tra i risultati fin qui ottenuti rappresenta il primo livello di valutazione (livello oggettivo). Si tratta di risultati 'quasi' oggettivi che si basano su ipotesi definite, anche se caratterizzate da un certo grado di incertezza come qualsiasi studio compreso nel campo dell'LCA.

Tuttavia la ricerca, orientata verso la creazione di uno strumento *user-friendly*, ha allargato i suoi confini verso l'ambito più soggettivo del tema della valutazione focalizzandosi sullo sviluppo di uno strumento 'utilizzabile' da parte di progettisti e da altri attori coinvolti nel processo costruttivo. In particolare, il secondo livello di valutazione esprime, attraverso pesi e punteggi, il valore di efficienza economico-ambientale più soggettivo e opinabile⁴, ma utile come strumento guida per la progettazione da applicare nelle fasi iniziali del processo, dal concepimento dell'idea architettonica.

marked by a certain degree of uncertainty as any LCA study. Nevertheless, the research presented includes a further more subjective step that consist in the development of a user-friendly instrument for designers and other subjects involved in the building process. In particular, this second level of evaluation expresses, through points and weights, an economic-environmental efficiency value⁴, which is more subjective and controversial but useful as a guiding tool for design process from architectural starting concepts.

€CO economic-environmental efficiency factor

The factor named €CO combines the effects of environmental impact of a building or part of it with its overall costs through the entire life cycle and it can be used to compare and evaluate different building options. Each result

obtained from the first level impact analysis (see fig. 3: tot LCC, tot LCA_(GWP) and tot LCA_(GER)) are turn into inputs for the economic-environmental efficiency factor.

Therefore, the primary aim of €CO is the comparison between a building technology representing the ordinary construction over the last few decades (the business as usual solution) with innovative or greener construction alternatives. Firstly, a component or a building representing the standard construction for a specific location or use, the *business as usual* «b», will be chosen and then compared with further solutions «j» in order to get both the economic performance and the environmental performance for each one (Fig. 3). In almost all the case studies analyzed the business as usual technology represent the best solution for the constructor. Actually, environmental issues and innovation technol-

Fattore di efficienza energetico-ambientale €CO

Il fattore di sintesi, denominato €CO, si basa sulla relazione tra aspetto economico e aspetto ambientale, ed è finalizzato al confronto tra componenti edilizi ed edifici alternativi. I valori ottenuti dall'analisi di impatto secondo gli indicatori specifici (in fig. 3: tot LCC, tot LCA_(GWP) e tot LCA_(GER)) costituiscono i dati di input per il calcolo del fattore di efficienza energetico-ambientale.

$$X_{j(LCC)} = \frac{\text{tot LCC}_b - \text{tot LCC}_j}{\text{tot LCC}_b}$$

$$X_{j(GWP)} = \frac{\text{tot LCA}_{b(GWP)} - \text{tot LCA}_{j(GWP)}}{\text{tot LCA}_{b(GWP)}}$$

$$X_{j(GER)} = \frac{\text{tot LCA}_{b(GER)} - \text{tot LCA}_{j(GER)}}{\text{tot LCA}_{b(GER)}}$$

03 | Performance economica (LCC) e performance ambientali (GWP e GER) dell'alternativa j in relazione al business as usual b
Relationship in term of economic performance (LCC) and environmental performance (GWP and GER) between solution j and business as usual b

Scopo del modello €CO è di confrontare tecnologie costruttive che rappresentano lo "standard tecnologico" degli ultimi decenni (il *business as usual*) con altre alternative, più innovative ed ecocompatibili. In quest'ottica, si sceglie un componente/edificio rappresentativo della pratica corrente, «b» il *business as usual*, che viene messo a confronto con le soluzioni alternative analiz-

zate, «j», al fine di ottenere un valore di performance ambientale ed economica di ognuna di esse (Fig. 3). Osservando i casi studio analizzati, si deve evidenziare che spesso la tecnologia individuata come *business as usual* coincide con la soluzione scelta dal costruttore. Gli aspetti ambientali e l'innovazione tecnologica non sono generalmente considerati criteri di scelta da parte dei costruttori, che preferiscono adottare tecniche costruttive abituali, di cui conoscono i modi di approvvigionamento dei materiali e la metodologia di messa in opera, e che scelgono sulla base del prezzo di mercato più vantaggioso.

La fase successiva di €CO è l'attribuzione dei pesi, secondo i criteri individuati all'inizio dell'analisi, a tutti gli impatti. Infine si calcola il fattore di sintesi che mette in rapporto ciascuna soluzione alternativa con il business as usual secondo la seguente formula:

$$\text{€CO} = (X_{LCC} * \eta_{LCC}) + (X_{GWP} * \eta_{GWP}) + (X_{GER} * \eta_{GER})$$

dove:

X_{LCC} = Performance economica

X_{GWP} = Performance ambientale in relazione all'impatto GWP

X_{GER} = Performance ambientale in relazione all'impatto GER

η_{LCC} η_{GWP} η_{GER} = Pesi relativi ai tre indicatori di impatto

€CO = (X_{LCC} * η_{LCC}) + (X_{GWP} * η_{GWP}) + (X_{GER} * η_{GER})
dove:
X_{LCC} = Performance economica
X_{GWP} = Performance ambientale in relazione all'impatto GWP
X_{GER} = Performance ambientale in relazione all'impatto GER
η_{LCC} η_{GWP} η_{GER} = Pesi relativi ai tre indicatori di impatto

Il valore che si ottiene, compreso tra 0 e 1, è adimensionale e rappresenta l'indice di efficienza economico-ambientale (il *business as usual* ha valore 0). Più l'indice si avvicina al valore 1, migliore è la performance complessiva del componente edilizio/edificio.

The values in the range 0 through 1 represent the economic-environmental efficiency factor. 'Zero' value correspond to the business as usual while the higher score is 1, so the closer to 1 the better the overall performance of the solution.

Results

The €CO model has been applied to a number of case studies as guidance for the evaluation of building materials and components. The table below shows key information of the analysis and results in summary (Fig. 4). Case studies were published in journals and presented at international and national congresses (Thiébat, 2009, 2009, 2010, 2012). They are focused on the life cycle sustainability assessment of buildings characterized by different uses (office, residential, school and industrial buildings).

For each solution a requirements and performances-based framework has

been built in relation with the functional unit definition. Energy requirements of envelope, such as thermal transmittance or thermal mass, are considered and further technological and environmental requirements are introduced, as for instance: high speed assembly/disassembly of construction elements, long expected service life materials, recycled/recyclable materials, shockproof systems, etc.

Looking at the results, some considerations arise:

- although weighting of results can be helpful to understand outcomes of the analysis also to who is not expert, the simplified results must be linked to a detailed survey to avoid misunderstanding;
- the use of the techniques described in this research (LCA, LCC and social LCA) is possible only in the case of big projects or pilot/prototype projects

with big investments due to the huge complexity of them;

- the assessment tool €CO, aiming at a winning design strategy, should be applied in the early stage of the process as a decision-making methodology to define the construction solutions that affect all the building life stages and to define the level of sustainability that will be reached.

Conclusion

A sustainable design approach requires investigation of all stages of a building life cycle right from the design and construction stage, considering the different perspectives of the stakeholders involved in the period of study. Although sustainability assessment criteria is a core issue on several excellent researches, oriented towards international standards and original methodology (Zamagni, 2012), we must point

Risultati

Al fine di sperimentare l'operatività del modello, il fattore ϵCO è stato applicato a casi studio con lo scopo di guidare la scelta di materiali e componenti edilizi. Una tabella riassume i dati che si riferiscono agli studi condotti e i risultati ottenuti (Fig. 4). I casi studio, pubblicati in riviste e presentati a congressi nazionali e internazionali (Thiébat, 2009, 2009, 2010, 2012), hanno come oggetto la valutazione della sostenibilità nel ciclo di vita di componenti di edifici con destinazioni d'uso diverse (terziario, residenziale, scolastico e industriale). Per ciascuna è stato costruito un quadro esigenziale-prestazionale diverso che si è riflesso nella definizione dell'unità funzionale. Oltre alle caratteristiche prestazionali energetiche richieste all'involucro, come la trasmittanza e l'inerzia termica, si è cercato di introdurre requisiti di carattere tecnologico-ambientale quali la rapidità di posa in opera/disassemblaggio dei componenti, la stima della loro durabilità nel tempo, la riciclabilità dei materiali, la resistenza agli urti dei sistemi, ecc.

Analizzando i risultati ottenuti, si possono fare alcune considerazioni:

- la pesatura è una semplificazione che facilita la comprensibilità dei risultati ai non addetti ai lavori favorendo la diffusione del metodo, ma che potrebbe portare a risultati contestabili se il valore finale fosse estrapolato da un'analisi dettagliata che ne attesti la validità;
- l'applicazione di metodologie a elevata complessità quali LCA, LCC e S-LCA è praticabile solo a fronte di una grande opera o progetto pilota per il quale si prevedano investimenti di grande entità;
- al fine di ottenere una strategia progettuale vincente, lo stru-

out that the concept of 'quality' in architecture, even linked to sustainability approach, rarely can be evaluated or assessed in an objective way. However, in the last decade, the widespread growth of assessment tools, often effectively used as design guidelines, and the growing attention of society to environmental and energy issues, have enhanced building construction quality. For these reasons energy consumption and pollution are decreasing and the demand of environmentally-friendly products is rising. This new trend is producing positive effects both on the market and on the society: a reduction of the delta in construction costs ascribed to sustainability, a growing sensitivity to green products from company and clients, the implementation of research & development activity within company and the launch of new sustainable actions.

NOTES

¹ The Brundtland Report defined sustainable as «development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs».

² Agenda 21 is a voluntarily implemented action plan point out at United Nations Conference on Environment and Development (UNCED) held in Rio de Janeiro, Brazil, in 1992. It is an action agenda for the UN, other multilateral organizations, and individual governments around the world that can be executed at local, national, and global levels.

³ Data source IEA, International Energy Agency, and year 2010

⁴ Normalization, aggregation and weighting are optional steps according to ISO 14040.

Building material or component analyzed	Building function, location	Reference
ROOF		
Office, North of Italy		Thiébat 2012 (SETAC, BERLIN)
Options		Results
Business as usual	R1 R2 R3	ECO
		R3 is the best option
Key elements included into Functional Unit: Thermal Transmittance (R-Value), Thermal mass in support of natural ventilation (Periodical Transmittance), Green roof technology, low construction cost.		
Indicators and weights		
LCA (50%)		LCC (50%)
S-LCA (0%)		
CED 25% GWP100a 25%		LCC 50%
Life Cycle System boundaries: product stage (raw materials supply, transport and manufacturing), use stage (replacement, refurbishment) and end-of-life stage (recycling/re-use and disposal)		
70 years expected building service life		
EXTERNAL WALL		
School, North of Italy		Thiébat 2010
Options		Results
Business as usual	P1 P2 P3	ECO
(various)		(various)
Key elements included into Functional Unit: Thermal Transmittance (R-Value), fast assemblage/disassembly construction techniques, flexibility		
Indicators and weights		
LCA (50%)		LCC (50%)
S-LCA (0%)		
CED 25% GWP100a 25%		LCC 50%
Life Cycle System boundaries: product stage (raw materials supply, transport and manufacturing), use stage (replacement, refurbishment)		
50 years expected building service life		
EXTERNAL WALL		
Residential, Central Italy		Thiébat 2009
Options		Results
Business as usual	P1 P2 P3	ECO
		P1 and P2 are the best solutions
Key elements included into Functional Unit: Thermal Transmittance (R-Value), Periodical Transmittance		
Indicators and weights		
LCA (50% - 66%)		LCC (50% - 33%)
S-LCA (0%)		
CED 25% - 33% GWP100a 25% - 33%		LCC 50% - 33%
Life Cycle System boundaries: product stage (raw materials supply, transport and manufacturing), use stage (replacement, refurbishment) and end-of-life stage (recycling/re-use and disposal)		
70 years expected building service life		
EXTERNAL WALL		
Industrial building, North of Italy		Thiébat 2009 (SETAC, GOTHEBORG)
Options		Results
Business as usual	P1 P2 P3	ECO
		P2 is the best solution
Key elements included into Functional Unit: Thermal Transmittance (R-Value), Fast assemblage/disassembly construction techniques, Shockproof system, Recycled materials.		
Indicators and weights		
LCA (50% - 66%)		LCC (50% - 33%)
S-LCA (0%)		
CED 25% - 33% GWP100a 25% - 33%		LCC 50% - 33%
Life Cycle System boundaries: product stage (raw materials supply, transport and manufacturing), use stage (replacement, refurbishment) and end-of-life stage (recycling/re-use and disposal)		
70 years expected building service life		

04 | Applicazioni del modello ϵCO a casi studio scelti
Examples of ϵCO model apply to selected case-studies

mento di valutazione dovrebbe essere applicato nella fase preliminare di progetto, momento determinante sia per le scelte progettuali/costruttive delle fasi successive sia per la definizione del livello di sostenibilità da raggiungere.

Conclusioni

Adottare un approccio progettuale sostenibile significa esplorare tutte le fasi del ciclo di vita di un edificio già in fase di progettazione e costruzione, considerando i diversi punti di vista degli *stakeholders* che intervengono nel periodo di analisi analizzato (Zamagni, 2012). Nonostante l'attività di ricerca, attraverso la messa a punto di metodi e di norme, continui a potenziare le opportunità per misurare la sostenibilità, occorre evidenziare che in architettura la qualità, seppur fondata sulla sostenibilità, difficilmente può essere misurata e valutata in modo oggettivo. Tuttavia, la diffusione crescente negli ultimi dieci anni dei metodi di valutazione, utilizzati spesso in modo efficace come linee guida progettuali, e la conseguente attenzione verso i temi ambientali ed energetici hanno permesso di migliorare la qualità del costruito, riducendo i consumi e le emissioni inquinanti nella fase d'uso e facendo aumentare la domanda di prodotti ecocompatibili, con relativi effetti positivi sul mercato e sulla società, come ad esempio: la diminuzione del delta-costi iniziale imputabile alle scelte progettuali sostenibili, la sensibilizzazione delle aziende e dei committenti verso nuovi prodotti ecocompatibili, il potenziamento dell'ambito della ricerca & sviluppo nelle aziende e l'avvio di nuove azioni collettive sostenibili.

NOTE

¹ Il Rapporto Brundtland definì lo sviluppo sostenibile quello «sviluppo capace di soddisfare i bisogni del presente senza compromettere le capacità delle generazioni future di soddisfare i propri bisogni».

² Nel 1992 la conferenza mondiale sull'ambiente tenutasi a Rio de Janeiro fissò i contorni della Local Agenda 21. Piano di azione per la diffusione dello sviluppo sostenibile da applicare a livello globale, nazionale e locale in ogni area in cui l'intervento dell'uomo può generare impatto sull'ambiente naturale.

³ Dati relativi al 2010. Fonte: IEA, *International Energy Agency*.

⁴ Normalizzazione, aggregazione e ponderazione sono elementi facoltativi per l'ISO 14040 che devono essere giustificati.

REFERENCES

Banham, R. (1969), *The Architecture of the Well Tempered Environment*, 1st edition, London, The Architectural Press, Chicago, trad. italiana a cura di Morabito, G. (1995), *Ambiente e tecnica nell'architettura moderna*, 2a ed. Laterza, Roma, Bari.

Benevolo, L. (1975), *Enciclopedia del Novecento*, Treccani, disponibile sul sito: http://www.treccani.it/enciclopedia/architettura_%28Enciclopedia_Novecento%29/ (accesso 12.02.2013).

Ciribini, G. (1984), *Tecnologia e Progetto. Argomenti di Cultura Tecnologica della Progettazione*, CELID, Torino.

Grigoriadis, D. (2009), *Project management e progettazione architettonica. Gestione e controllo del progetto: dalla ideazione alla costruzione*, DEI Editore, Roma.

Grosso, M. (2011), "La valutazione della sostenibilità degli edifici: lo sviluppo normativo CEN", *U&C - Unificazione e Certificazione*, n. 4, pp. 54-58.

Haapio, A. e Viitaniemi, P. (2008), "A critical review of building environmental assessment tools", *Environmental Impact Assessment Review*, n. 28, pp. 469-482.

Hunkeler, D., Lichtenvort, K. e Rebitzer, G. (2008), *Environmental Life Cycle Costing*, SETAC Books, CRC Press, New York.

Klöpffer, W. (2008), "Life Cycle Sustainability Assessment of Products", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 13 No.2, pp. 89-94.

ISO 15686-5:2008 Buildings and constructed assets -- Service-life planning -- Part 5: Life-cycle costing.

Mateus, R. e Bragança L. (2011), "Sustainability assessment and rating of buildings: Developing the methodology SBToolPT-H", *Building and Environment*, Vol. 46 n. 10, pp. 1962-1971.

Peretti, G. e Thiébat, F. (2012), "La valutazione della sostenibilità degli edifici" in Buscemi, V. (Ed.) *Dossier. Un Futuro sostenibile ed ecocompatibile*, U&C. Unificazione e Certificazione, Mediavalve srl, Milano, n.4, pp. 35-37.

Project Management Institute (2008), *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide) - Fourth Edition*.

Saheb, Y. (2012), "Buildings Are we on track in Europe?", paper presented at ECEEE - The challenge of the IEA-WEO: European Policies and Measures to deliver the needed efficiency improvements November 21st, 2012, Brussels.

Swarr, T., Hunkeler, D., Klöpffer, W., Pesonen, H.L., Citroth, A., Brent, A.C. e Pagan, R. (2011), "Environmental life cycle costing: a code of practice", *Int J Life Cycle Assess*, n. 16, pp. 389-391.

Thiébat, F. (2009), "Valutazione economico-ambientale di soluzioni di involucro edilizio", *Costruire in Laterizio*, Vol. 132., pp. 48-54.

Thiébat, F. (2009), "Sustainable Design: economic and environmental life cycle assessment model", poster presented at *SETAC Europe 19th Annual Meeting*, Göteborg.

Thiébat, F. (2010), "Integrazione tra LCA e LCC in edilizia: sviluppo di un modello di valutazione economico-ambientale basato sul ciclo di vita", *Il Progetto Sostenibile*, Vol. 27, pp. 62-67.

Thiébat, F. (2012), "LCC evaluation of building components including environmental impacts", poster presented at *6th SETAC World Congress/SETAC Europe 22nd Annual Meeting*, Berlin.

Torricelli, M. C. e Mecca, S. (1996), *Qualità e gestione del progetto nella costruzione*, Alinea, Firenze.

UNI EN ISO 14040:2006 Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework.

UNI EN ISO 14044:2006 Environmental management -- Life cycle assessment -- Requirements and guidelines.

Valdivia, S., Ugaya, C.M.L., Sonnemann, G. e Hildenbrand J. (2011), *Towards a life cycle sustainability assessment. Making informed choices on products*, UNEP, Paris.

Zamagni, A. (2012), "Life cycle sustainability assessment", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 17 No.4, pp. 373-376.

Zevi, B., *Saper vedere l'architettura*, Einaudi, Torino, 1948.