

Roberto Giordano^a, Francesca Thiebat^a, Valentina Serra^b, Ema Madalina Budau^a,

^aDipartimento di Architettura e Design, Politecnico di Torino, Italia

^bDipartimento Energia, Politecnico di Torino, Italia

roberto.giordano@polito.it

francesca.thiebat@polito.it

valentina.serra@polito.it

Abstract. L'articolo intende porre in evidenza come costruire in condizioni ambientali eccezionali (ad es. cantieri inaccessibili ai mezzi tradizionali, condizioni climatiche particolarmente rigide, ecc.) e ridurre l'impatto ambientale del costruito conducendo all'adeguamento delle tecniche costruttive, attraverso applicazioni di materiali, anche tradizionali, ma resi più performanti da processi di produzione fuori opera e in opera particolarmente innovativi. Uno studio Life Cycle Assessment ha permesso di confrontare l'impatto della paglia di riso come materiale costruttivo avente funzione sia portante sia di isolamento, e di confrontare i risultati conseguiti con scenari alternativi caratterizzati da materiali convenzionalmente impiegati in edilizia come la lana di roccia, il laterizio e il cemento armato.

Parole chiave: Life Cycle Assessment; Architettura montana; Paglia di riso; Processo edilizio.

Introduzione

Per definire il contesto di riferimento, ovvero la relazione che intercorre tra architettura e montagna, non si può prescindere dai vincoli che un progetto ad alta quota, fin dalle antiche origini, deve affrontare: la protezione dalla natura e la razionalizzazione delle operazioni di cantiere e di utilizzo.

Fin dal 1750, a partire dalla costruzione dei primi rifugi alpini, le tecniche costruttive e i materiali da adottare in cantieri straordinari, difficilmente accessibili e strettamente connessi alle condizioni climatiche, hanno portato a privilegiare morfologie elementari basate su sistemi standardizzati. Una sorta di prefabbricazione con assemblaggio in opera: in officina, si progettano e si realizzano i componenti e in situ si assemblano (Gibello, 2011).

Per quanto attiene, invece, i temi di salvaguardia dell'ambiente, che vanno di pari passo con una crescente preoccupazione sull'antropizzazione dello spazio alpino, essi trovano una prima

Integrated assessment
methods applied to
the materials of a high-
altitude building

Abstract. The article intends to highlight how building in exceptional environmental conditions (e.g. sites inaccessible to traditional vehicles, particularly harsh climate conditions, etc.) and reducing the environmental impact of the built environment lead to the adjustment of construction techniques, through applications of materials, even traditional, but made more efficient by innovative offsite and onsite production processes. A Life Cycle Assessment study has enabled to compare the impact of rice-based straw bale as a building material having both a load-bearing and insulation function, and to compare the results achieved with alternative scenarios characterised by materials conventionally used in construction, such as rock wool and concrete and masonry.

Keywords: Life Cycle Assessment; Mountain architecture; Rice-based straw bale; Building process.

forma di regolamentazione nel 1991 con la Convenzione delle Alpi¹.

Non ultime anche le Direttive Europee, come la UE 2010/31 UE e il Regolamento Prodotti da Costruzione (UE) N. 305/2011 che vincolano le scelte di progetto e costruzione, rendendo necessario l'uso di materiali certificati, il contenimento dei fabbisogni di energia primaria, la gestione controllata e lo smaltimento dei rifiuti speciali, ecc.

Il sistema normativo a livello europeo negli ultimi decenni ha contribuito alla crescente diffusione di edifici energeticamente autonomi in fase d'uso. Al diminuire del fabbisogno energetico della fase operativa, la quota di energia necessaria per le fasi di approvvigionamento dei materiali, produzione dei componenti e assemblaggio in opera, acquisisce un'importanza sempre maggiore in termini di impatto globale (Giordano et al., 2017).

In tale contesto la caratterizzazione dei requisiti di ecocompatibilità, tecnici e morfologici del progetto è stata oggetto di un'attività di ricerca il cui obiettivo principale è la valutazione dell'impatto tecnologico e ambientale di un edificio residenziale costruito in alta montagna impiegando come materiale principale la paglia di riso.

L'edificio è stato sottoposto a ristrutturazione e ampliamento da parte dell'arch. Tiziana Monterisi ed è localizzato a Chamois (AO), un comune a 1815 metri s.l.m. non accessibile alle auto e raggiungibile esclusivamente a piedi, in funivia o in elicottero (Fig. 1).

Al team di ricerca interdisciplinare è stato chiesto di valutare in modo sinergico i condizionamenti imputabili ai limiti temporali e operativi delle attività di cantiere e alle modalità di gestione

Introduction

To define the relevant context, or the relationship between architecture and the mountains, it is important to focus on the constraints that a high altitude design, from its ancient origins, must address: on one side, protection from nature and, on the other, the rationalisation of construction and use operations. Since 1750, from the construction of the first alpine lodges, construction techniques and the materials to be used in extraordinary sites, difficult to access and closely connected to climate conditions, led to favouring morphological elements based upon standardised systems. This was a sort of pre-fabrication with onsite assembly: downstream, in the workshop, the components were designed and created and they were assembled in situ (Gibello, 2011).

As regards, on the other hand, environmental protection issues, which go

hand in hand with the growing concern regarding the anthropisation of the Alpine space, these found an initial form of regulation in 1991 with the Alpine Convention¹.

In addition, the European Directives, particularly EU 2010/31 and the Construction Products Regulation (EU) no. 305/2011, restrict design and construction decisions, requiring the use of certified materials, the containment of primary energy requirements, controlled management and disposal of special waste, etc.

The regulatory system at European level in recent decades has contributed to the growing dissemination of energy-independent buildings in the use stage. As the energy requirement of the operating stage reduces, the energy contribution of the stages of materials procurement, component production and assembly in situ acquire increasing

del processo operativo e manutentivo con gli effetti ambientali connessi all'uso di materie prime rinnovabili come legno, paglia e altri materiali di origine vegetale.

Il caso studio diventa così paradigma di un approccio scientifico, replicabile in contesti che presentano altrettante caratteristiche di complessità geografica, costruttiva e temporale, volto a correlare i requisiti connotanti gli edifici costruiti in luoghi estremi con requisiti di tipo energetico ambientale (Fig. 2).

Metodi e strumenti per valutare le prestazioni tecnologiche e di ecocompatibilità dei materiali

I criteri adottati nello stabilire quali fossero i materiali a minor impatto ambientale non si sono dunque limitati a uno studio "tradizionale" Life Cycle Assessment (LCA), prevalentemente

focalizzato sulle fasi di produzione fuori opera secondo un approccio cradle-to-gate (UNI EN ISO 14040). L'importanza attribuita alla fase di costruzione, manutenzione, nonché la rilevanza attribuita alla capacità dei materiali di offrire prestazioni termiche idonee alle condizioni climatiche del luogo ha richiesto di valutare l'ecocompatibilità degli stessi secondo un approccio autenticamente orientato al ciclo di vita, valutando l'impatto energetico e ambientale dell'intero processo edilizio e, di conseguenza, sviluppando un metodo capace di correlare simultaneamente requisiti di differente natura. Ciò ha richiesto di caratterizzare le diverse categorie di impatto energetico ambientale attraverso strumenti di normazione (UNI EN 15978:2011) e di modellazione, anche di tipo informatico, appropriati.

Le fasi di produzione fuori opera, di produzione in opera e di manutenzione e i potenziali scenari di fine vita sono stati oggetto

di caratterizzazione energetica-ambientale attraverso la raccolta di dati diretti e l'impiego di dati indiretti.

In particolare l'analisi dei processi e la successiva valutazione è stata condotta utilizzando in modo sinergico tre strumenti: eToolLCD* un open-source LCA software; SimaPro V. 8.2.3 un software di modellazione LCA dei flussi di input e output e di valutazione di alcune categorie di effetti ambientali; IREEA (Initial and Recurring Embodied Energy Assessment) un foglio di calcolo, sviluppato dal gruppo di ricerca del DAD, per valutare il contenuto di energia primaria da fonti rinnovabili e da fonti fossili in alcune fasi del ciclo di vita di un edificio e il corrispondente indice di rinnovabilità.

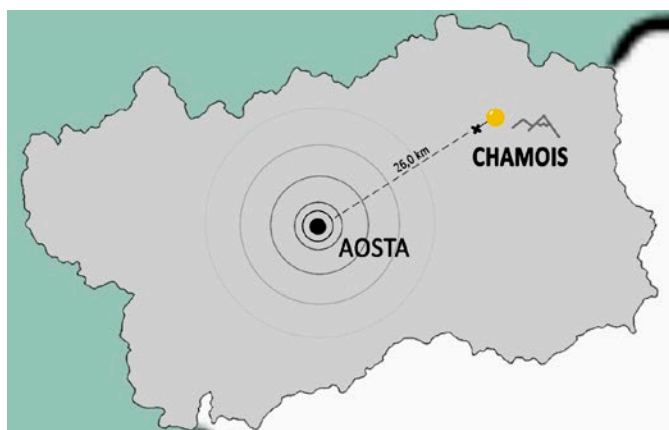
In modo analogo lo studio della fase di d'uso si è basato sull'impiego di dati ricavati dalle schede tecniche dei prodotti e raccolti in fase di costruzione e da dati elaborati da un foglio di calcolo elaborato dal gruppo di ricerca del DENERG in conformità alle specifiche tecniche normative (UNI/TS 11300: 2014).

La "filiera" dell'edificio di Chamois

Coerentemente agli obiettivi dichiarati e alla metodologia adottata, si è proceduto alla delimitazione della filiera dell'edificio, con l'intenzione di classificare per parti definite il ciclo di vita dell'edificio, analizzarne i flussi, valutarne gli impatti ambientali e rendere possibile una comparazione fase per fase con soluzioni progettuali alternative. Tale filiera include le attività produttive primarie e di trasformazione e distribuzione dei prodotti.

L'estensione del concetto di filiera dal settore agro-alimentare al settore edilizio nasce, pensando alla casa di Chamois, come un prodotto complesso dove il sistema delle chiusure e delle parti-

di caratterizzazione energetica-ambientale attraverso la raccolta di dati diretti e l'impiego di dati indiretti.



01 | Sito di progetto (sx) e trasporto dei pannelli (dx), foto Studio Tiziana Monterisi
Project site (left) and transportation of the closures (right), image Studio Tiziana Monterisi

THE EXISTING BUILDING



YEAR OF CONSTRUCTION:	1854
USABLE FLOOR AREA:	117 m²
GROSS FLOOR AREA:	176 m²
BEARING STRUCTURE:	STONE SUPPORTING STRUCTURE, WOODEN FLOORS & ROOF
WINDOWS:	WOOD & IRON (NO GLAZING)

THE BUILDING IN PROJECT



YEAR OF CONSTRUCTION:	2016-2017
USABLE FLOOR AREA:	140 m²
GROSS FLOOR AREA:	200 m²
BEARING STRUCTURE:	PREFABRICATED FRAMES IN WOOD & RICE STRAW, LAMINATED WOOD BEAMS, PILLARS & PANELS, REINFORCED CONCRETE FOUNDATION
WINDOWS:	LOW-EMISSIVITY TRIPLE GLAZING & LAMINATED

importance in terms of global impact (Giordano et al., 2017).

In that context, the characterisation of the eco-compatibility, technical and morphological requirements of the design has been subject to research activity whose main aim is to assess the technological and environmental impact of a residential building built at high altitude using as its main material rice-based straw bale.

The building was subjected to redevelopment and expansion by the architect Tiziana Monterisi and is located in Chamois (AO) a town located 1815 metres above sea level not accessible by car and only accessible on foot, by cable car or by helicopter (Fig. 1).

The interdisciplinary research team was asked to assess in synergy the influences attributable to temporal and operational limits of the site activities and the methods of managing the

operational and maintenance project (for example: limitation of requirements, self-production, accumulation and storage systems, etc.) with the environmental effects related to the use of renewable raw materials, such as wood, straw and other materials of plant origin.

The case study thus becomes a paradigm of a scientific approach, replicable in contexts that present similar characteristics of geographical, construction and temporal complexity, aimed at correlating the requirements connoting buildings constructed in extreme locations with requirements of environmental energy nature (Fig. 2).

Methods and tools for assessing the technological performances and eco-compatibility of the materials

The criteria adopted in establishing which materials have the lowest envi-

ronmental impact were not, therefore, limited to a "traditional" Life Cycle Assessment (LCA) study, mainly focused on the offsite production stages and classified in accordance with UNI EN ISO 14040 as a cradle-to-gate approach. The importance attributed to the construction and maintenance stages as well as the significance attributed to the capacity of the materials to offer thermal performances suited to the climate conditions of the location required the assessment of the eco-compatibility of the same according to an approach authentically oriented to the life-cycle, assessing the environmental energy impact of the entire building process and, as a result, developing a method capable of correlating simultaneously requirements of different nature. This required the characterisation of different categories of environmental energy impact

through appropriate standardisation instruments (UNI EN 15978:2011) and modelling tools, also of IT nature. The offsite production, onsite production and maintenance stages, as well as the potential end-of-life scenarios were subject to energy-environmental characterisation through the collection of direct data and the use of indirect data, taken from databases and simulation software.

In particular, the analysis of the processes and subsequent assessment was conducted using in a synergic manner three tools: eToolLCD * an open-source, LCA software; SimaPro V. 8.2.3 LCA modelling software of input flows (material and energy resources) and output flows (emissions into the air, water and waste) and assessment of some categories of environmental effects; IREEA (Initial and Recurring Embodied Energy Assessment)

zioni e il sistema degli impianti concorrono in modo coordinato al soddisfacimento di un quadro esigenziale articolato, definito nella fase di progettazione.

Tale approccio si basa sull'identificabilità degli elementi e componenti edilizi e impiantistici che compongono la "filiera dell'edificio"² al fine di quantificare gli impatti associati a ciascun elemento e all'edificio nel suo insieme (Thiebat, 2013; El Khouli et al., 2015).

Fasi del ciclo di vita

L'edificio esistente, in stato di grave deterioramento dal punto di vista statico, è stato oggetto di demolizione e ricostruzione. La nuova struttura, in coerenza con il quadro esigenziale specifico del costruire ad alta quota, è stata pensata per minimizzare le operazioni di cantiere in situ e mantenere una forte coerenza con i materiali tipici del luogo. L'edificio è costituito da fondazioni in cemento armato, una struttura portante a telai prefabbricati in legno e paglia di riso combinata con travi e pilastri in legno lamellare, contro pareti interne in lana di pecora e fibra di legno rivestite con lastre di argilla intonacate con argilla proveniente da cave locali e muratura esterna in pietra di recupero dalla demolizione del rudere preesistente. Il lavoro di prefabbricazione dei telai è consistito principalmente nell'assemblaggio di montanti e traversi in legno KVH, nel riempimento degli stessi con balle in paglia compressa e nel successivo fissaggio delle tavole di abete grezzo per la controventatura dei telai; la fase di montaggio in opera ha previsto unicamente l'impiego di connessioni di tipo metallico.

I trasporti dei materiali sono avvenuti via terra e tramite l'uso della funivia. Per gli elementi prefabbricati, le travi, i pilastri e i serramenti è stato necessario inoltre l'uso dell'elicottero dal paese de La Magdeleine al sito di progetto.

a calculation sheet, developed by the DAD research group, through which to assess the primary energy content from renewable sources and from fossil sources in some lifecycle stages of a building and the corresponding renewability index.

Similarly, the study of the use stage was based upon data taken from the technical data sheets of the products and collected in the construction stage and data developed from a calculation sheet drawn up by the DENERG research group in conformity with regulatory technical specifications (UNI/TS 11300: 2014).

The "supply chain" of the Chamois building

Coherently with the declared objectives and the methodology adopted, the supply chain of the building was outlined, with the intention of clas-

sifying by defined parts the lifecycle of the building, analysing its flows (input-output), assessing its environmental impacts and enabling a phase-by-phase comparison with alternative design solutions. It includes the primary production activities and transformation and distribution of products and it can be transferred from the agro-food sector also to the construction industry.

The extension of the supply chain concept applied to the building arises when thinking of the Chamois house as a complex product where the system of closures and partitions and the set of systems contribute in a coordinated manner to satisfying a complex and articulated framework of requirements defined in the design stage.

That approach is based upon the identification of the building and plant elements and components that make up

Per la fase d'uso, date le particolari condizioni climatiche del sito, non si è ritenuta necessaria l'inclusione di sistemi per la ventilazione e il raffrescamento, già garantiti dai serramenti apribili e dall'elevata inerzia termica delle strutture. Lo studio si è quindi focalizzato sulla determinazione del fabbisogno di energia per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria (ACS). In accordo con le norme UNI TS serie 11300 è stato quantificato il fabbisogno energetico primario per la climatizzazione invernale dell'edificio (21 kWh/m²anno) con un generatore a biomassa e il fabbisogno di energia utile per ACS (20 kWh/m² anno) prodotta da un boiler elettrico alimentato da impianto fotovoltaico.

La vita utile dell'edificio è stata stimata inizialmente di 50 anni, come raccomandato da diversi studi e norme (NTC, 2018). In un secondo tempo, considerando la possibilità di estendere la durata dell'edificio nel tempo attraverso interventi di manutenzione, sono stati ipotizzati altri due scenari di 70 e 100 anni.

Nella fase di manutenzione, per ciascun materiale, sono stati stimati i valori di durata prevista, la tipologia di interventi, l'intervallo di manutenzione e l'eventuale trasporto di attrezzatura e materiali. Tali valori sono stati ricavati da manuali e casi studio (Molinari 2002, Albano J-R. 2008).

Nella fase di smaltimento e demolizione, per ciascun materiale è stato considerato lo scenario più sostenibile dal punto di vista ambientale.

Confronto tra casi studio

Due scenari di progetto alternativi sono stati analizzati al fine di confrontare il progetto in paglia e legno con soluzioni tecno-

the "supply chain of the building"² in order to quantify the impacts associated with each element and the building as a whole (Thiebat, 2013; El Khouli et al., 2015).

Life cycle stages

The existing building, in a state of severe deterioration from the static perspective, has been demolished and reconstructed. The new structure, in coherence with the specific framework of requirements of building at high-altitude, was designed to minimise the site operations in situ and to maintain strong coherence with the typical materials of the location. The building is constituted by foundations made from reinforced concrete laid in situ, a load-bearing structure with prefabricated wood and rice-based straw bale frames and plywood pillars, against internal walls in sheep's wool and wood fibre

covered with clay slabs plastered with clay originating from local quarries and exterior recovered stone masonry (originating from the demolition of the previous ruin). The prefabrication work of the frames consisted mainly of assembling the uprights and cross-pieces in KVH wood, filling the same with compressed straw bales and subsequently fixing the raw fir boards for the bracing of the frames; the assembly stage in situ involved only the use of metal type connections.

Materials are transported by land to the cable car station which connects to the town of Chamois. For the prefabricated elements, beams, pillars and window frames, a helicopter also had to be used from the town of La Magdeleine to the project site.

Data of the pre-use stage (off-site production, transportation and construction) were gathered together in inven-

logiche di riferimento più convenzionali. La prima alternativa è caratterizzata da un sistema costruttivo in cemento armato e laterizio e la seconda si basa su un sistema a telai portanti in legno e lana di roccia.

Le tre soluzioni si differenziano per tipologia e materiali della struttura portante e dell'involucro, mentre mantengono lo stesso sistema costruttivo, delle fondazioni, dei rivestimenti e di copertura, e impiantistico. Obiettivo di tale confronto è la definizione dei seguenti parametri di valutazione:

1. prestazioni energetiche;
2. impatti ambientali nel ciclo di vita;
3. tempi di costruzione.

Per quanto riguarda le prestazioni energetiche in fase d'uso, si può evidenziare che nelle tre soluzioni varia il fabbisogno energetico per il riscaldamento a causa della differenza di prestazioni termiche dell'involucro (Fig. 3). La valutazione degli impatti energetici e ambientali sarà illustrata nel paragrafo seguente, mentre per quanto riguarda i tempi di cantiere sono da preferire soluzioni a secco dei telai prefabbricati (legno-paglia e legno-lana di roccia) che eludono tempi di asciugatura in cantiere e accelerano la messa in opera degli elementi.

Valutazioni e Risultati

Lo studio LCA è stato condotto in una prima fase sull'edificio

realizzato a Chamois e in una seconda fase confrontando i risultati con i due scenari di progetto alternativi. Le tabelle 1 e 2 riportano alcune delle caratteristiche principali degli elementi tecnici. La prima riga illustra graficamente l'elemento tecnico; la

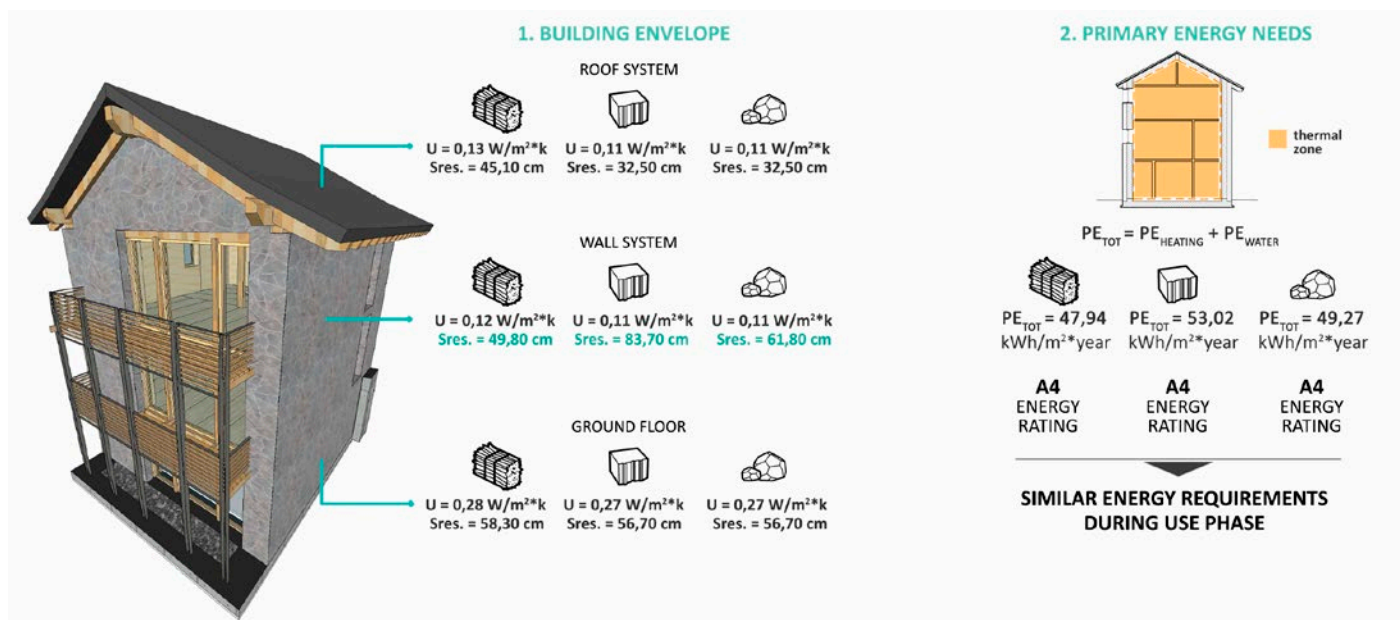
seconda riga definisce i principali materiali che costituiscono la stratigrafia degli elementi tecnici; le righe successive forniscono i dati, elemento per elemento, delle seguenti categorie di impatto ambientale³:

- Embodied Energy e Operational Energy [kWh];
- Abiotic Depletion Potential [kWh];
- Embodied Carbon e Operational Carbon [kg CO₂eq];
- Water footprint [m³].


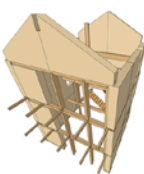
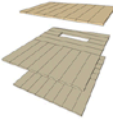


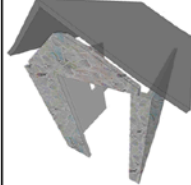
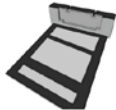
L'utilità di analizzare l'impatto di ciascun elemento e non solo dell'edificio nel suo complesso è da ricondurre alle condizioni specifiche di progetto e di costruzione. Ogni soluzione alternativa è stata analizzata considerando: trasporti, tempi di esecuzione, operazioni di sostituzione e potenziali procedure di dismissione.

L'utilizzo della medesima unità funzionale ha consentito di sommare i singoli contributi e di valutare in fase successiva l'impatto energetico-ambientale dell'intero edificio. La sommatoria dei valori (Fig. 4), ricavati da dati diretti, da banche dati e da software di modellazione, consente di determinare un valore cumulativo di energia primaria (EE + OE), definito BEA. Il BEA è normalizzato rispetto alla superficie utile (140 m²) e in funzione della vita utile dell'edificio (50 anni).

Poiché la quantificazione dell'Embodied Energy (EE) considera il contenuto di energia primaria sia da fonti non rinnovabili sia da rinnovabili e siccome nel caso del legno e della paglia il contenuto di energia primaria da fonti rinnovabili non è da considerare come un impatto negativo in termini di esauribilità delle risorse (Giordano, 2010)⁴, si è proceduto alla determinazione di



Tab. 1 |

Elements	Vertical & external insulation	Inter-storey floors	Roof system	Windows	External cladding	Foundations & retaining wall
						
Materials & components	1) Wooden wall frames 2) Rice straw filling 3) Laminated wood beams and pillars 4) Laminated wood staircase 5) Steel staircase	1) Load-bearing panels in laminated wood	1) Wooden roof frames 2) Rice straw filling 3) Laminated wood beams	1) Laminated wood frames 2) Low-emissivity triple glazing	1) Recovery stone cladding 2) Cement mortar 3) Breathable sheet in PP 4) Fir boards and planks 5) "Spagna" stone slabs	1) Lean concrete 2) Reinforced concrete beams & retaining wall 3) Hot bitumen
Weight [kg]	15.792,00	6.504,40	6.452,00	1.626,00	91.792,70	50.830,75
Embodied Energy [kWh]	4.727,00 straw provided for insulation 124.087,14	8.088,89	1.200,00 straw provided for insulation 60.720,00	10.755,19	177.777,78	28.750,00
Abiotic Depletion Potential (fossil fuels) [kWh]	1.605,46 straw (1,3%) provided for insulation 50.463,67	29.845,11	407,56 straw (0,7%) provided for insulation 23.526,00	7.391,53	158.333,33	28.194,44
Embodied Carbon [kgCO₂eq]	1.526,49 straw (3%) provided for insulation 38.487,00	15.352,00	387,51 straw (1,6%) provided for insulation 11.549,00	8.239,48	54.500,00	20.450,00
Water footprint [m³]	1.192,11 straw (3%) provided for insulation 82,00	35,05	302,63 straw (2,6%) provided for insulation 0,63	15,54	1.231,19	63,00

Tab. 1 | Elementi tecnici dell'edificio legno e paglia di riso e caratterizzazione degli impatti


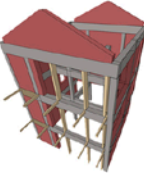
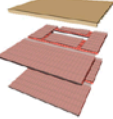
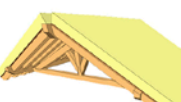

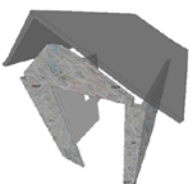
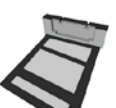
Technical elements of the wood and rice-based straw bale building and characterisation of the impacts

un secondo valore cumulativo che prende in sola considerazione i contributi energetici da fonti fossili: BEA_{NRR} . Dai risultati si deduce che l'Operational Energy (OE) è inferiore al valore di EE totale e al valore di EE iniziale. Analizzando la sola componente da fonti non rinnovabili la differenza tra OE ed EE è ancora più significativa. Per effetto delle specifiche operazioni richieste per la posa di alcuni elementi tecnici, come l'uso dell'elicottero, e poiché si è previsto l'impiego di una quota si-

gnificativa di risorse rinnovabili per la climatizzazione, l' EE_{T+C} risulta di poco superiore al valore di OE. È inoltre interessante analizzare il rapporto tra i valori di BEA e BEA_{FNR} . La quota di risorse rinnovabili impiegate nel ciclo di vita dell'edificio è pari a circa il 55%.

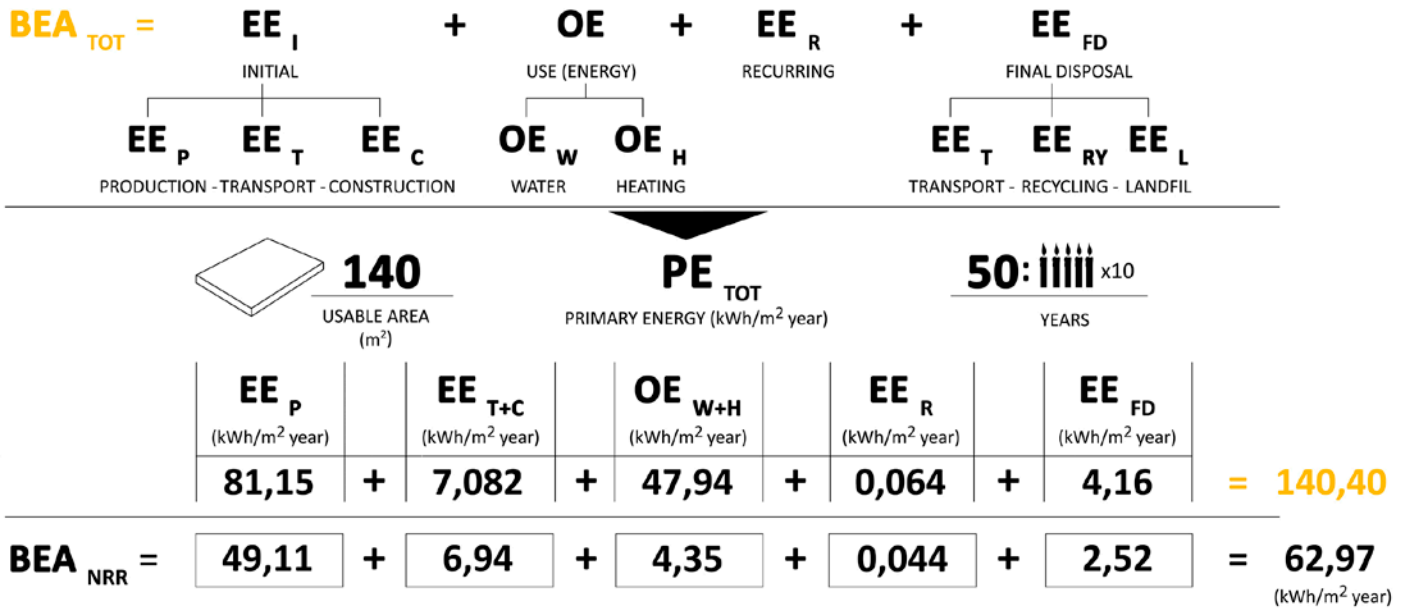
Estendendo l'analisi a uno degli scenari alternativi considerati (edificio in cls armato e laterizio), lo studio restituisce prestazioni energetiche simili, con la sola eccezione delle fasi di tra-

Tab. 2 |

Elements	Vertical structure & external insulation	Inter-storey floors	Roof system	Windows	External cladding	Foundations & retaining wall
						
Materials & components	1) Reinforced concrete beams & pillars 2) Reinforced concrete staircase 3) Brick blocks 4) Outer coat in XPS 5) Wood laminated beams	1) Brick blocks 2) Prestressed concrete joists 3) Concrete castings 4) Electrically welded mesh 5) Laminated wood beams 6) Fir wood planks	1) Laminated wood truss frames 2) Laminated wood beams & pillars 3) Fir wood planks 4) Insulation in XPS	1) Laminated wood frames 2) Low-emissivity triple glazing	1) Recovery stone cladding 2) Cement mortar 3) Breathable sheet in PP 4) Fir boards and planks 5) "Spagna" stone slabs	1) Lean concrete 2) Reinforced concrete beams & retaining wall 3) Hot bitumen
Weight [kg]	119.214,40 1.673,15 XPS provided for insulation	24.952,24	4.862,00	1.626,00	91.792,70	50.830,75
Embodied Energy [kWh]	256.359,00 53.258 XPS (21%) provided for insulation	48.873,00	715,00 XPS provided for insulation 71.965,00	10.755,19	177.777,78	28.750,00
Abiotic Depletion Potential (fossil fuels) [kWh]	226.593,00 50.707 XPS (22%) provided for insulation	33.797,00	40.454,00 21.680 XPS (54%) provided for insulation	7.391,53	158.333,33	28.194,44
Embodied Carbon [kgCO₂eq]	104.605,00 23.016 XPS (22%) provided for insulation	17.567,78	16.559,00 9.919 XPS (60%) provided for insulation	8.239,48	54.500,00	20.450,00
Water footprint [m³]	287,00 155,61 XPS (52%) provided for insulation	47,00	94,35 66,50 XPS (70%) provided for insulation	15,54	1.231,19	63,00

Tab. 2 | Elementi tecnici dell'edificio in cls armato e laterizio e caratterizzazione degli impatti

Technical elements of the building in reinforced concrete and brick blocks and characterisation of the impacts



sporto dei materiali in cantiere e di produzione in opera che nel caso del calcestruzzo e del laterizio è sensibilmente maggiore: EE_P = 80,12 kWh/m²anno; EE_{T+C} = 30,47 kWh/m²anno; OE_{W+H} = 53,02 kWh/m²anno; EE_R = 0,063 kWh/m²anno; EE_{FD} = 3,86 kWh/m²anno. La differenza è più marcata se si confrontano i risultati inerenti la sola quota di contenuto di energia primaria da fonti non rinnovabili. Il rapporto tra BEA e BEA_{NRR} restituisce, infatti, una percentuale di fonti rinnovabili (correlata all'indicatore ADP) inferiore rispetto a quella dell'edificio in legno e paglia di riso, pari al 40%. Considerando, invece, i processi di trasporto e produzione in opera la percentuale di risorse non rinnovabili impiegate per queste fasi raggiunge quasi

l'80%.

Una procedura analoga è stata adottata per la valutazione di un secondo parametro, correlato ai rilasci di anidride carbonica equivalente dell'edificio realizzato in legno e paglia di riso (Fig. 5): il BCA (kgCO_{2eq}/m²anno). L'impatto del processo di trasporto e della fase di produzione fuori opera (EC_{T+C}) è quasi pari al 50% del totale. Ciò è da imputare ai fattori di conversione, che in funzione dei mezzi di trasporto, quantificano i rilasci di diverse sostanze in atmosfera in rilasci di CO₂ eq. Rispetto all'indicatore selezionato è particolarmente significativa la differenza tra la fase d'uso (OC_{W+H}) e le fasi di produzione fuori opera e in opera, di circa 80% delle emissioni equivalenti (EC_P + EC_{T+C}).

tory tables which, for each material, include: quantities, source of direct or indirect data, means of transport and distance, installation time and disposal scenario.

For the use stage, given the particular climate conditions of the site, it was not deemed necessary to include ventilation and cooling systems, as these were already guaranteed by the opening windows and by the high thermal inertia of the structures. The study was therefore focused on determining the energy requirement for winter heating and for the production of domestic hot water (DHW). In accordance with the standards UNI TS series 11300 the primary energy requirement was quantified for the winter heating of the building (21 kWh/m²year) with a biomass generator and the useful energy requirement for DHW (20 kWh/m² year) produced by an electric boiler

powered by a fotovoltaic system.

The service life of the building was initially estimated at 50 years, as recommended by various studies and standards (NTC, 2018). Later, considering the possibility of extending the building lifespan over time through maintenance interventions, another two scenarios of 70 and 100 years were hypothesised.

In the maintenance stage, for each material, the expected duration values were estimated along with the type of interventions, the maintenance interval and any transportation of equipment and materials. Those values were taken from manuals and case studies (Molinari 2002, Albano J-R. 2008).

In the disposal and demolition stage, the most sustainable scenario was considered for each material from the environmental perspective (recycling, energy recovery, disposal in landfill). Similarly to what was done in the

offsite production, construction and maintenance stages, an inventory sheet was also drawn up for the end-of-life stage which indicates, for each material, the quantity and the transportation (type and distance travelled).

Comparison between case studies

Two alternative design scenarios were analysed to compare the design in straw and wood with more conventional technological solutions. The analysis was conducted with the same useful floor area and heated volume and leaving unchanged the orientation and relationship between opaque and transparent surface areas. The first alternative is characterised by a construction system in reinforced concrete and brick and the second is based upon a system of load-bearing frames in wood and rock wool.

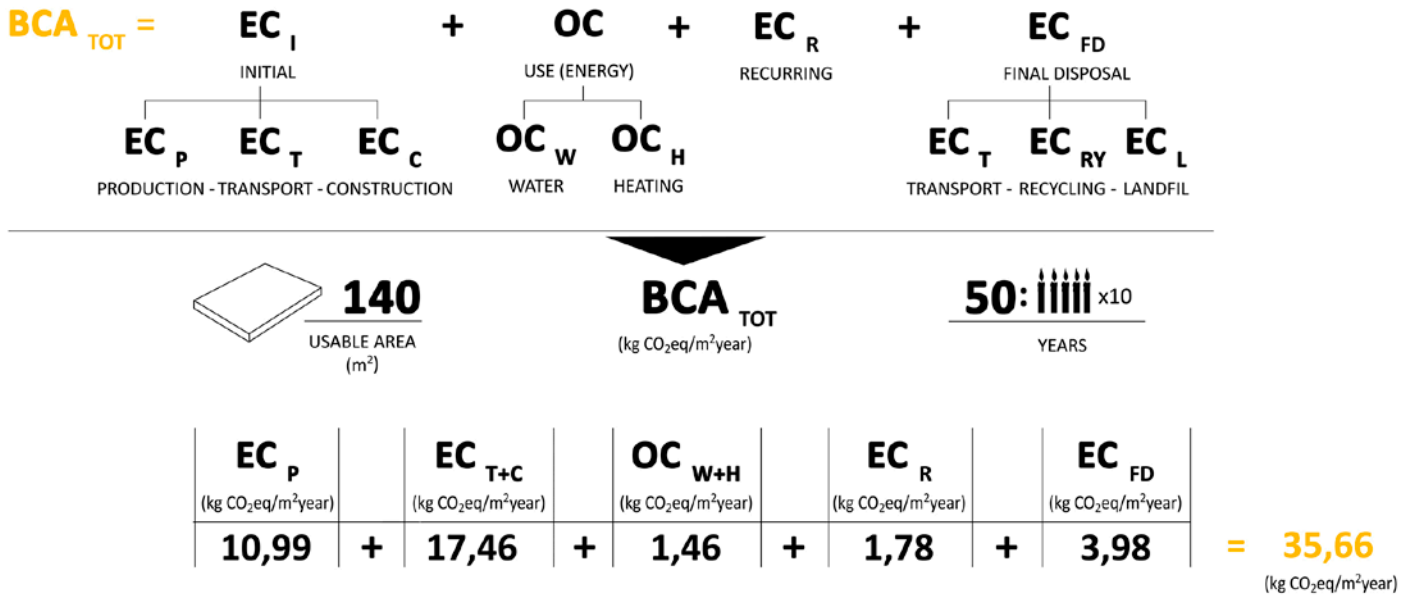
The three solutions differ in terms of

type and materials of the load-bearing structure and the building envelope, while they maintain the same construction system of the foundations, the internal and external cladding and the roof covering. The plant system is also identical for all alternatives.

The aim of that comparison was to define the following assessment parameters:

1. energy performances;
2. environmental impacts in the life cycle;
3. construction times (site duration).

As regards the energy performances in the use stage, it can be highlighted that in the three solutions, the energy requirement varies for heating due to the difference in thermal performances of the building envelope (Fig. 3). The assessment of the energy and environmental impacts in the lifecycle will be illustrated in the following paragraph,



I dati dello scenario di progetto in calcestruzzo e laterizio sono i seguenti: EC_P = 23,40 kgCO_{2eq}/m²anno; EC_{T+C} = 16,00 kgCO_{2eq}/m²anno; OC_{W+H} = 1,47 kgCO_{2eq}/m²anno; EC_R = 1,70 kgCO_{2eq}/m²anno; EC_{FD} = 3,23 kgCO_{2eq}/m²anno. I risultati hanno un andamento simile a quello dell'edificio in legno e paglia di riso, con l'eccezione della fase di produzione in opera cui è associato un impatto superiore. Anche per questo scenario l'impatto della fase d'uso è inferiore ai processi di produzione in opera e fuori opera. La tabella 3, infine, riporta i risultati dei tre scenari. I valori riportati nelle colonne si riferiscono ad alcune categorie di impatto selezionate nello studio LCA, in relazione all'unità funzionale adottata. L'ultima colonna riporta la durata monitorata e stimata

per la posa in opera, in conformità alla tecnica costruttiva analizzata. Si noti che mentre per alcune categorie il valore rimane pressoché costante, per altre, in rapporto ai materiali impiegati, ai processi di trasporto e alle modalità di posa in opera i valori sono sensibilmente differenti. E come evidenziato in precedenza le condizioni del sito di progetto giocano un ruolo significativo e non trascurabile nel definire la portata degli impatti.

Conclusioni

I risultati del lavoro di ricerca conducono ad alcune riflessioni conclusive sul rapporto tra materia, progetto ed ecocompatibilità. In condizioni di progetto particolari, come nel caso di Cha-

while as regards the site timescales, dry construction systems with prefabricated frames are favoured (wood-straw and wood-rock wool) which avoid drying times onsite and accelerate the installation of the elements (overall site duration of 6 months).

Assessments and results

The LCA study was conducted in an initial phase on the building constructed in Chamois and at a later stage by comparing the results with the two alternative design scenarios. Tables 1 and 2 indicate some of the main characteristics of the technical elements. The first line graphically illustrates the technical element; the second line defines the main materials that constitute the stratigraphy of the technical elements; the subsequent lines provide the details, element by element, of the following environmental impact categories³:











- Embodied Energy and Operational Energy [kWh];
 - Abiotic Depletion Potential [kWh];
 - Embodied Carbon and Operational Carbon [kg CO₂eq];
 - Water footprint [m³].
- The utility of analysing the impact of each element and not only of the building as a whole is attributable to the specific design and construction conditions. In the case of the Chamois building, each alternative solution was analysed and characterised in terms of impact considering: transportation methods, implementation timescales, replacement operations and potential disposal procedure. The use of the same functional unit in the inventory and environmental impact assessment stages allowed for the individual contributions to be added together and to assess at a later stage the energy-environmental impact of

the entire building. In the case, for example, of the flow chart in Fig. 4, it illustrates the way in which the "items" are quantified which define the energy balance of the building. The sum of the values, taken from direct data, from databases and from modelling software, allows for a cumulative value of primary energy to be determined - Embodied Energy (EE) + Operational Energy (OE) - defined as: Building Energy Analysis (BEA). The BEA is normalised with respect to the useful surface area (140 m²) and based upon the useful life of the building (50 years). Since the quantification of the EE considers both the primary energy content from non-renewable sources and the primary energy content from renewable sources and since in the case of wood and straw the primary energy content from renewable sources is not

to be considered as a negative impact in terms of depletion of resources (Giordano, 2010)⁴, a second cumulative value was determined which only considers the energy contributions from fossil fuels: Building Energy Analysis from Non Renewable Resources (BEA_{NRR}). Based upon the analysis and assessment tools adopted and in relation to the type of data subject to processing, it is deduced that the OE is less than the total value of EE and the initial value of EE. Analysing only the component from non-renewable sources, the difference between OE and EE is even more significant. By virtue of the specific operations required for the installation of some technical elements, which required the use of extraordinary means such as the helicopter, and since the use of a significant portion of renewable resources

Tab.3 | Confronto tra le categorie di impatto degli scenari di progetto
 Comparison between the impact categories of the project scenarios

| Tab. 3

	 OE	 EE	 OC	 EC	 H₂O USE	 H₂O INITIAL+E.O.F.	 TIME CONSTRUCT.
Scenario1 	47,94 kWh/m ² year	92,46 kWh/m ² year	1,46 kgCO ₂ /m ² year	34,20 kgCO ₂ /m ² year	0,037 m ³ /m ² year	0,28 m ³ /m ² year	6 months
Scenario4 	53,02 kWh/m ² year	114,49 kWh/m ² year	1,47 kgCO ₂ /m ² year	44,31 kgCO ₂ /m ² year	0,037 m ³ /m ² year	0,32 m ³ /m ² year	9 months
Scenario7 	49,27 kWh/m ² year	109,90 kWh/m ² year	1,46 kgCO ₂ /m ² year	34,93 kgCO ₂ /m ² year	0,037 m ³ /m ² year	0,29 m ³ /m ² year	7 months

LEGEND

- Operational Energy
- Embodied Energy
- Operational Carbon
- Embodied Carbon
- Water footprint (use)
- Water footprint (initial + end of life)
- Total duration of construction works

mois, i materiali assumono ancora un ruolo fondamentale, pur in un contesto culturale dove la dimensione fisica del costruito sembra aver assunto una dimensione ancillare rispetto agli elementi immateriali del progetto. I materiali utilizzati nell'edificio sono il risultato di un processo di selezione nel quale è stato necessario mediare istanze di natura tecnica, formale e ambientale. Fibre naturali e di antica origine sono state oggetto di trasformazione e, per alcuni aspetti, portate a una produzione di tipo seriale e industriale, in modo da garantire la posa in opera con tecniche costruttive non convenzionali. Tali soluzioni sono, allo stesso tempo, in grado di concorrere al rispetto di esigenze paesaggistiche senza cadere in trappole "in stile", che non appartengono alla cultura architettonica contemporanea. Infine, le loro peculiarità sul piano energetico e ambientale ha consentito di

is planned for the heating, the EE_{T+C} is slightly higher than the OE value. It is also interesting to analyse the ratio between the values of BEA and BEA_{FNR} . The share of renewable resources used in the building lifecycle amounts to about 55%. Extending the analysis to one of the alternative scenarios considered, in particular that relating to the building design in reinforced concrete and brick, the study identifies energy performances similar to those of the building in wood and rice-based straw bales, with the sole exception of the transportation stages of the materials onsite and production onsite which, in the case of concrete and brick, is significantly higher (site duration 9 months): $EE_p = 80.12$ kWh/m²year; $EE_{T+C} = 30.47$ kWh/m²year; $OE_{W+H} = 53.02$ kWh/m²year; $EE_r = 0.063$ kWh/m²year; $EE_{FD} = 3.86$ kWh/m²year. The

difference is more marked when comparing the results relating to only the share of primary energy content from non-renewable sources. The ratio between BEA and BEA_{FNR} identified, in fact, a percentage of renewable sources (correlated to the indicator ADP) lower than that of the building in wood and rice-based straw bales, equal to 40%. Considering, on the other hand, the transportation and production onsite processes, the percentage of non-renewable resources used for these stages reaches almost 80%. A similar procedure was adopted for the assessment of a second parameter, related to the equivalent carbon dioxide emissions of the building constructed in wood and rice-based straw bales (Fig. 5): the Building Carbon Analysis (BCA - kgCO_{2eq}/m²year). The impact of the transportation process and the offsite production stage

limitarne l'impatto che, secondo alcuni indicatori ambientali, non è affatto trascurabile.

In riferimento alla valutazione dell'ecocompatibilità, l'aver contemplato tutte le fasi del ciclo di vita dell'edificio, non solo ha consentito di definire i processi più significativi, ma ha evidenziato come questi non appartengano a fasi convenzionalmente analizzate da buona parte della letteratura scientifica. Lo studio intende inoltre contribuire alla definizione di una metodologia di analisi e valutazione che potrebbe essere un utile paradigma di riferimento in tutti quei casi dove le condizioni del sito di progetto siano così specifiche da influenzare in modo considerevole le prestazioni che gli elementi tecnici e il sistema degli impianti devono essere in grado di offrire.

Vi sono indubbiamente limiti metodologici strettamente con-

(Embodied Carbon for transport and construction - EC_{T+C}) is almost 50% of the total. This is to be attributed to conversion factors, which based upon the means of transport, quantify the emissions of various substances into the atmosphere into releases of equivalent CO₂. With respect to the selected indicator, the difference between the use stage (Operational Carbon - OC_{W+H}) and the offsite and onsite production stages is particularly significant, to which approximately 80% of the equivalent emissions corresponds ($EC_p + EC_{T+C}$).

The data of the project scenario with the building created in concrete and brick are the following: $EC_p = 23.40$ kgCO_{2eq}/m²year; $EC_{T+C} = 16.00$ kgCO_{2eq}/m²year; $OC_{W+H} = 1.47$ kgCO_{2eq}/m²year; $EC_r = 1.70$ kgCO_{2eq}/m²year; $EC_{FD} = 3.23$ kgCO_{2eq}/m²year. The results have a similar trend to that of the

building in wood and rice-based straw bale, with the exception of the onsite production stage with which a higher impact is associated. Also for this scenario the impact of the use stage is lower than the onsite and offsite production processes.

Table 3, finally, indicates the results of the three scenarios analysed in the research work. The values indicated in the columns refer to some categories of impact selected in the LCA study, in relation to the functional unit adopted. The last column indicates the duration monitored and estimated for the installation onsite, in conformity with the analysed construction technique. It should be noted that while for some categories the value remains largely constant, for others, in relation to the materials use, the transportation processes and the methods of installation onsite, the values are significantly dif-

nessi alle caratteristiche intrinseche di una LCA (facilità di accesso alle informazioni delle fasi del processo edilizio, utilizzo di banche dati internazionali, qualità e quantità dei riferimenti bibliografici), tuttavia la ricerca è stata in grado di costruire un modello dove si è privilegiato un approccio finalizzato alla costruzione di una “libreria” di soluzioni stratigrafiche, valutate lungo il loro ciclo di vita, che a seconda del contesto possono essere sostituite o implementate, in modo da garantire la replicabilità spaziale e temporale del modello stesso.

RICERCHE DI RIFERIMENTO, RILEVANZA DEL TEMA, SOGGETTI COINVOLTI, FINANZIAMENTI

La ricerca è stata condotta in collaborazione con l'arch. Tiziana Monterisi⁵. La raccolta e l'elaborazione dati è avvenuta con il supporto di Novello Case e RiceHouse.

SCHEDA TECNICA DEL PROGETTO

Ristrutturazione e ampliamento di edificio residenziale

Progettista

Studio Tiziana Monterisi Architetto

Località

Chamois (AO)

Committente

Privato

Cronologia

2016-17

ferent. As highlighted above, the conditions of the project site play a significant and non-negligible role in defining the extent of the impacts.

Conclusions

The results of the research work lead to some conclusive reflections on the relationship between materials, project and eco-compatibility. In special design conditions, such as in the case of Chamois, the materials assume an even more fundamental role, albeit in a cultural context where the physical dimension of the built environment appears to have assumed an ancillary dimension with respect to the intangible elements of the design. The materials used in the building are the result of a selection process in which it was necessary to mediate requirements of technical, formal and environmental nature. Natural fibres of ancient origin

were transformed and, for some aspects, transferred to serial and industrial production, so as to guarantee the installation with unconventional construction techniques. Those solutions are, at the same time, able to contribute to respect of landscape requirements without falling into “in style” traps, which do not belong to contemporary architectural culture. Finally, their peculiarities on the level of energy and environment allow for their impact to be limited which, according to some environmental indicators, is not negligible.

In reference to the eco-compatibility assessment, the fact of having contemplated all lifecycle stages of the building not only allows for the most significant processes to be defined but also highlighted how these do not belong to stages conventionally analysed by a good part of scientific literature.

CONTRIBUTO DEGLI AUTORI

La raccolta e l'analisi dei dati, inclusi diagrammi e tabelle, sono stati elaborati da E. Budau con il supporto degli altri autori. Il primo e il terzo capitolo sono da attribuire a F. Thiebat. Il secondo e il sesto a R. Giordano. Il settimo congiuntamente a Giordano e Thiebat. Il quarto e il quinto sono frutto di lavoro collegiale di tutti gli autori.

NOTE

¹ Trattato internazionale sottoscritto dai Paesi alpini (Austria, Francia, Germania, Italia, Liechtenstein, Monaco, Slovenia e Svizzera) e dall'Unione Europea.

² Un approccio di tipo sistemico deve consentire il controllo del tutto attraverso le sue componenti e viceversa, nonché delle interrelazioni che si stabiliscono tra le parti come «un insieme di entità connesse tra loro in modo organizzato» (Ciribini, G. Tecnologia e progetto: argomenti di cultura tecnologica della progettazione, Celid 1995).

³ Gli indicatori di impatto scelti sono oggetto di particolare attenzione da parte della comunità scientifica, nonché dei policy-makers, in virtù della loro relazione con i cambiamenti climatici, il consumo di risorse energetiche non rinnovabili e il consumo delle risorse idriche.

⁴ Tale valore è da correlare al potere calorifico superiore della biomassa.

⁵ Premio Sostenibilità 2017 (www.settimanabioarchitetturaedomotica.it).

GLOSSARIO/GLOSSARY

OE = *Operational Energy* - fabbisogno di Energia Primaria in fase d'uso dall'edificio

EE = *Embodied Energy* - fabbisogno di Energia Primaria di processo/prodotto nel ciclo di vita

EE_p; EE_t; ... = *Embodied Energy* relativa alle diverse fasi: I (iniziale /initial); P (produzione /production); t (trasporto /transportation); C (costruzione /

The study also intends to contribute to defining an analysis and assessment methodology that could be a useful paradigm of reference in all those cases where the conditions of the project site are so specific as to influence considerably the performances that the technical elements and the set of systems must be able to offer.

There are undoubtedly methodological limitations that are closely connected with the intrinsic characteristics of an LCA (ease of access to information on the building process stages, use of international databases, quality and quantity of bibliographic references); however, the research was able to construct a model which favoured an approach aimed at the construction of a “library” of stratigraphic solutions, assessed throughout their life cycle, which, according to the context, may be replaced or implemented, so as to

guarantee the possibility of spatial and temporal replication of the model itself.

REFERENCE RESEARCH, RELEVANCE OF THE TOPIC, ENTITIES INVOLVED, FUNDING

The research was conducted as part of the collaboration with the architect Tiziana Monterisi, the designer of the residential building in Chamois⁵. The collection and processing of information occurred with the support of the company Novello Case and the company RiceHouse.

construction); W (acqua calda sanitaria /domestic hot water); H (riscaldamento /heating); R (recurring); FD (fine vita /end of life); RY (riciclaggio / recycling); L (discarica /landfill)

EC = *Embodied Carbon* - impatto ambientale associato all'immissione di gas serra in ambiente di processo/prodotto nel ciclo di vita

OC = *Operational Carbon* - impatto ambientale associato all'immissione di gas serra infase d'uso

ADP = *Abiotic Depletion Potential* - impatto ambientale associato all'esaurimento potenziale delle risorse abiotiche terrestri legato al consumo di fonti energetiche fossili

WF = *Water Footprint* - impatto ambientale associato al consumo delle fonti d'acqua

BEA = *Building Energy Analysis* - Fabbisogno di energia primaria complessivo

BEA_{FNR} = *Building Energy Analysis from Non Renewable Resources* - Fabbisogno di energia primaria complessivo da sole fonti non rinnovabili (EE+OE)

BCA = *Building Carbon Analysis* - indicatore di impatto complessivo associato all'immissione di gas serra (EC+OC)

ACS/DHW = *Acqua Calda Sanitaria/Domestic hot water*

REFERENCES

Albano, J.R. (2008), *La manutenzione degli edifici. 250 schede pratiche*, Ed. Italiana a cura di Talamo, C., Sistemi Editoriali, Pozzuoli (NA).

Basbagill, J.P. (2013), *Integration of life cycle assessment and conceptual building design*, Stanford University, USA.

Corum, N. and Goodall, J. (2005), *Building a Straw Bale House: The Red Feather Construction Handbook*, New York, USA.

El khouli, S., John, V. and Zeumer, M. (2015), *Sustainable Construction Techniques*, Detail Green Books Monaco.

Gibello, L. (2011), *Cantieri dalta quota. Breve storia della costruzione dei rifugi sulle Alpi*, Lineadaria, Biella.

TECHNICAL DATA SHEET OF PROJECT

Redevelopment and expansion of residential building

Designer

Studio Tiziana Monterisi Architetto

Location

Chamois (AO)

Client

Private

Chronology

2016-17

CREDITS

Data collection and analysis related to the case study, including diagrams and tables, were developed by E. Budau with the support of the other authors. F. Thiebat wrote the first and third chapters. R. Giordano wrote the second and the sixth. Giordano and Thiebat wrote the seventh jointly. The

fourth and fifth chapters are the result of joint work among all the authors.

NOTES

¹ International treaty signed by the Alpine nations (Austria, France, Germany, Italy, Liechtenstein, Monaco, Slovenia and Switzerland) and the European Union.

² A systemic approach must allow the control of the whole through its components and vice versa, as well as the interrelations that are established among the components themselves as «a set of entities connected to each other in an organized way» (Ciribini, G. *Tecnologia e progetto: argomenti di cultura tecnologica della progettazione*, Celid 1995).

³ Impact indicators that have been selected are subject to particular attention by the scientific community, as well as the policymakers, by virtue of

Giordano, R., Serra, V., Demaria, E., Duzel, A. (2017), "Embodied Energy Versus Operational Energy in a Nearly Zero Energy Building Case Study", *Energy Procedia*, Vol. 111.

Giordano, R. (2010), *I prodotti per l'edilizia sostenibile*, Sistemi Editoriali, Naples.

Molinari, C. (2002), *La manutenzione come requisito di progetto*, Sistemi Editoriali, Naples.

Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC), aggiornamento D.M. 17 gennaio 2018.

Thiébat, F. (2013), "Life-cycle design for sustainable architecture", *Techné Journal of Technology for Architecture and Environment*, Vol. 5.

their relationship with climate changes, consumption of non-renewable energy resources and consumption of water resources.

⁴ That value is to be correlated to the higher calorific value of the biomass.

⁵ Sustainability Award 2017 (www.settimanabioarchitetturaedomotica.it).