

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI  
BOLOGNA**

---

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL  
TERRITORIO**

**TESI DI LAUREA**

in

*Valorizzazione delle risorse primarie e secondarie M*

**ANALISI LCA DELLE CASE DI PAGLIA DI  
PESCOMAGGIORE (AQ)**

**CANDIDATO**  
Davide Peroni

**RELATORE**  
Prof.ssa Ing. Alessandra Bonoli

**CORRELATORI**  
Ing. Cristian Chiavetta  
Ing. Sara Rizzo

Anno Accademico 2010/2011  
Sessione II



# Indice

<b>Introduzione .....</b>	<b>7</b>
<b>Parte prima - Normativa di riferimento.....</b>	<b>9</b>
<u><b>1.1 La Direttiva 2002/91/CE</b></u> .....	11
<u><b>1.2 La normativa italiana</b></u> .....	13
1.2.1 <u>Il DPR 59/09 e le Linee Guida Nazionali</u> .....	15
1.2.2 <u>Requisiti delle prestazioni energetiche degli edifici</u> .....	16
<u><b>1.3 Considerazioni conclusive</b></u> .....	19
<u><b>1.4 Attestato di Certificazione Energetica</b></u> .....	20
<u><b>1.5 L'Agencia CasaClima</b></u> .....	23
<u><b>1.6 Normativa edilizia</b></u> .....	25
<u><b>1.7 I prodotti da costruzione</b></u> .....	28
<u><b>1.8 Norme tecniche</b></u> .....	31
<b>Parte seconda - Le case di paglia .....</b>	<b>33</b>
<u><b>2.1 Storia delle case di paglia</b></u> .....	35
<u><b>2.2 La paglia come materiale da costruzione</b></u> .....	38
<u><b>2.3 Umidità e permeabilità al vapore</b></u> .....	39
2.3.1 <u>Proprietà dell'intonaco</u> .....	42
2.3.2 <u>Metodologie per la misura di umidità</u> .....	46
2.3.3 <u>Conclusioni sulla strumentazione</u> .....	48
2.3.4 <u>Risultati dei test</u> .....	49
<u><b>2.4 Resistenza al fuoco</b></u> .....	50
<u><b>2.5 Isolamento termico</b></u> .....	53
2.5.1 <u>La prova tedesca</u> .....	57
2.5.2 <u>La prova austriaca</u> .....	59
2.5.3 <u>Le prove danesi</u> .....	61
2.5.4 <u>Conclusioni</u> .....	66
<u><b>2.6 Isolamento acustico</b></u> .....	67

2.6.1 Esempio di valutazione di $R'_w$ per una casa di paglia.....	70
<b>2.7 L'autocostruzione</b> .....	72
2.7.1 Gli obiettivi dell'autocostruzione .....	74
2.7.2 La gratuità della manodopera e la compartecipazione .....	75
2.7.3 Le modalità dell'autocostruzione .....	76
2.7.4 La necessità di un'Alta regia.....	77
<b>2.8 Conclusioni</b> .....	78
<b>Parte terza - Life Cycle Assessment .....</b>	<b>79</b>
<b>3.1 Che cos'è un LCA</b> .....	81
3.1.1 Normativa di riferimento .....	82
<b>3.2 Metodologia LCA</b> .....	83
3.2.1 Differenti tipologie di LCA .....	85
<b>3.3 La struttura LCA</b> .....	87
3.3.1 Definizione degli obiettivi e dei confini del sistema.....	89
3.3.2 Redazione e analisi dell'inventario .....	91
3.3.3 Analisi degli impatti .....	93
3.3.4 Interpretazione dei risultati .....	94
3.3.5 Software per LCA .....	95
<b>3.4 LCA in edilizia</b> .....	96
3.4.1 Eco-Indicator 99.....	98
3.4.2 EPS 2000.....	100
3.4.3 EDIP .....	101
<b>Parte quarta - Il caso di studio .....</b>	<b>103</b>
<b>4.1 Pescomaggiore</b> .....	105
<b>4.2 Il progetto EVA</b> .....	108
4.2.1 La ricerca dell'ALMA .....	111
<b>4.3 Descrizione della casa di paglia</b> .....	113
<b>4.4 Analisi LCA della casa di paglia di Pescomaggiore</b> .....	119
4.4.1 Definizione obiettivi e campo di applicazione.....	119
4.4.2 Confini di sistema e unità funzionale .....	119

4.4.3 <u>Descrizione della casa di paglia</u> .....	120
<b><u>4.5 Le fonti per il reperimento dei dati di inventario</u></b> .....	121
4.5.1 <u>Fase di cantiere</u> .....	121
4.5.2 <u>Fase d'uso</u> .....	124
4.5.3 <u>Fine vita</u> .....	125
<b><u>4.6 Inventario</u></b> .....	126
4.6.1 <u>Trasporti</u> .....	126
4.6.2 <u>Fase di cantiere</u> .....	127
4.6.3 <u>Fase d'uso</u> .....	140
4.6.4 <u>Fine vita</u> .....	141
<b><u>4.7 Analisi degli impatti e interpretazione dei risultati</u></b> .....	143
4.7.1 <u>Metodo ECO-Indicator 99</u> .....	144
4.7.2 <u>Metodo EPS 2000</u> .....	151
4.7.3 <u>Metodo EDIP</u> .....	154
<b><u>4.8 Conclusioni</u></b> .....	158
 <b>Bibliografia</b> .....	 159



# Introduzione

11 dicembre 2011, Durban (Sudafrica)

Ce l'hanno fatta, il mondo trova l'accordo sul clima; è stato rinnovato il protocollo di Kyoto.

Dopo lunghi e difficili negoziati si è riuscito a rinnovare il Protocollo di Kyoto, come regime di transizione verso un nuovo accordo globale che dovrà coinvolgere le maggiori economie del pianeta.

La "Piattaforma di Durban" prevede infatti la sottoscrizione di un nuovo accordo globale entro il 2015 e la sua applicazione a partire dal 2020. Ci vorranno quindi ancora quattro anni per definire i contributi dei vari Paesi, ma già da oggi è chiaro che il carico fiscale sui combustibili fossili aumenterà, mentre gli investimenti sull'efficienza e sulle fonti rinnovabili saranno premiati.

"L'Europa", ha dichiarato il presidente di Legambiente Vittorio Cogliati Dezza, "da subito si deve fare promotrice, con il sostegno dell'Italia, di un piano per aggiornare al 30% il proprio impegno di riduzione delle emissioni di gas-serra al 2020".

Il 31% dell'energia elettrica e il 44% dell'energia termica, proveniente da combustibili fossili, vengono utilizzati in ambito residenziale, in uffici e aree commerciali. Buona parte di queste fonti energetiche sono destinate alla climatizzazione dei locali (riscaldamento invernale e raffrescamento estivo).

Sul 100% di energia finale consumato in casa, soltanto il 2% serve all'illuminazione, il 5% per cucinare e per gli elettrodomestici, **mentre il 15% per il rifornimento di acqua calda e il 78% per il riscaldamento! se poi si ha un impianto di raffrescamento/condizionamento estivo si deve aggiungere un buon 25% in più di consumi energetici.**

Attualmente in Italia il fabbisogno energetico negli edifici complessivo è quantificabile mediamente in 300 kWh/(m<sup>2</sup>·anno).

Questa tesi di laurea ha un duplice scopo: da un lato l'analisi delle caratteristiche delle balle di paglia usate come materiale da costruzione, dall'altro la valutazione ambientale tramite metodologia LCA di un intervento di reinsediamento post-sisma a Pescomaggiore, in Abruzzo, realizzato con edifici in balle di paglia autocostruiti.

Nella parte prima si focalizza l'attenzione sulle direttive europee e i loro recepimenti italiani a cui fare riferimento per la gestione energetica degli edifici, oltre ad una panoramica sulla certificazione energetica. Si riportano inoltre sinteticamente quelle parti della normativa edilizia che riguardano le costruzioni con materiali innovativi.

La parte seconda è il frutto di una lunga fase di ricerca bibliografica, in cui si è cercato di fare chiarezza sulle caratteristiche della paglia: traspirabilità, isolamento termico, resistenza al fuoco e fonoassorbimento le parti su cui si è maggiormente rivolta l'attenzione.

Nella parte terza viene descritta dettagliatamente la metodologia LCA, e in particolare la sua applicazione nel campo dell'edilizia: le diverse fasi in cui si compone, l'uso di software e di banche dati appropriate e i metodi più utilizzati per l'analisi degli impatti.

Nella quarta ed ultima parte viene descritto dettagliatamente il caso di studio: una delle case di paglia dell'Ecovillaggio di Pescomaggiore; segue una descrizione accurata della fase di inventario, effettuata anche tramite un sopralluogo in sito. Infine vengono riportati e commentati i risultati dell'analisi, ed espresse considerazioni e proposte migliorative.



**Parte prima**

# **Normativa di riferimento**



## **1.1 La Direttiva 2002/91/CE**

Il consumo di energia per i servizi connessi agli edifici equivale a circa un terzo del consumo energetico dell'UE. La Comunità non può influire molto sull'approvvigionamento di energia (esula, comunque, dal tema che ci si propone in questo lavoro), ma può agire sulle situazioni che ne determinano la domanda. In particolare, per la tematica che si sta affrontando, ridurre il consumo di energia migliorando l'efficienza energetica delle abitazioni è una delle possibili soluzioni.

La Direttiva 2002/91/CE (Energy Performance Building Directive) si inserisce nell'ambito delle iniziative della Comunità in relazione ai cambiamenti climatici e alla sicurezza dell'approvvigionamento, e mira proprio a realizzare ingenti risparmi attraverso iniziative nel settore residenziale e in quello terziario (uffici, edifici pubblici ecc.), contribuendo così al conseguimento degli obiettivi preposti.

Per affrontare questa problematica in una vera visione d'insieme; occorre definire misure a livello comunitario, e in particolare la 2002/91/CE si prefigge di raggiungere i seguenti obiettivi:

- diminuire del 22% i consumi energetici comunitari entro il 2010;
- ottenere un risparmio di energia primaria pari a 55 milioni di TEP (tonnellate equivalenti di petrolio: rappresenta la quantità di energia rilasciata dalla combustione di una tonnellata di petrolio grezzo e vale circa 42 GJ);
- ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub> di un valore pari a 100 milioni di tonnellate;
- introdurre nuovi standard progettuali.

La direttiva tratta quindi tutti gli aspetti dell'efficienza energetica degli edifici, e comprende quattro elementi principali:

- una metodologia comune di calcolo del rendimento energetico integrato degli edifici;

- i requisiti minimi sul rendimento energetico degli edifici di nuova costruzione e degli edifici già esistenti sottoposti a importanti ristrutturazioni;
- i sistemi di certificazione degli edifici di nuova costruzione ed esistenti e l'esposizione negli edifici pubblici degli attestati di rendimento energetico e di altre informazioni pertinenti;
- l'ispezione periodica delle caldaie e degli impianti centralizzati di aria condizionata negli edifici e la valutazione degli impianti di riscaldamento dotati di caldaie installate da oltre 15 anni.

In sintesi, le Direttiva richiede agli stati membri di provvedere affinché gli edifici di nuova costruzione e quelli esistenti sottoposti a ristrutturazioni importanti soddisfino requisiti minimi di rendimento energetico, monitorando “la quantità di energia effettivamente consumata o che si prevede possa essere necessaria per soddisfare i vari bisogni connessi ad un uso standard dell’edificio, compresi, fra gli altri, il riscaldamento e il raffreddamento”.

L'Attestato di Certificazione Energetica deve essere messo a disposizione in fase di costruzione, compravendita o locazione. In esso devono essere riportati “dati di riferimento che consentano ai consumatori di valutare e raffrontare il rendimento energetico dell’edificio” e “raccomandazioni per il miglioramento del rendimento energetico in termini di costi-benefici”.

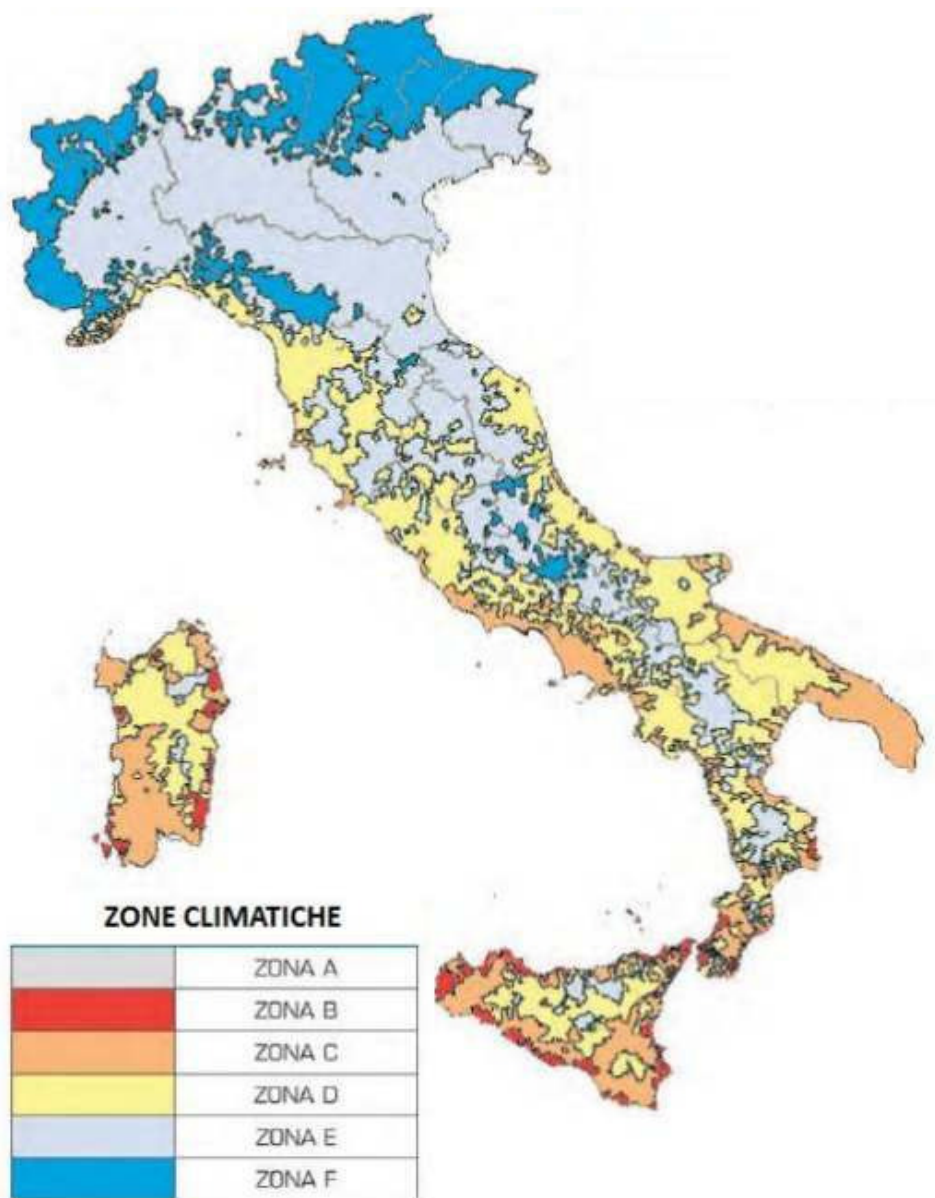
## **1.2 La normativa italiana**

In Italia la direttiva europea 2002/91/CE è stata recepita dal D.Lgs. 192/2005, che aveva stabilito una serie di misure dirette a ridurre il consumo di energia di tutti gli edifici presenti sul territorio italiano, introducendo la Certificazione energetica degli edifici. Seppur in attesa di decreti attuativi che ne chiariranno le modalità applicative, il D.Lgs. 192/2005 ha modificato sostanzialmente i criteri progettuali per il risparmio energetico, spostando maggiormente l'attenzione sugli elementi tecnologici, sui materiali e sulle loro proprietà termofisiche.

Successivamente il D.Lgs. 311/2006 (Disposizioni correttive ed integrative al D.Lgs. 192/2005) modifica la disciplina della certificazione energetica e la metodologia di calcolo per il rendimento energetico degli edifici; impone inoltre nuovi limiti al fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione invernale degli edifici e alle trasmittanze di tutte le componenti dell'involucro edilizio.

Le disposizioni hanno un approccio prestazionale: vengono indicati i valori limite di fabbisogno di energia per il riscaldamento invernale (E<sub>Pi</sub>), dell'involucro, differenziati per zone climatiche (→ *figura 1*) e con tre soglie temporali: gennaio 2006, gennaio 2008 e gennaio 2010.

Il 3 marzo 2008 viene pubblicato il D.Lgs. 115, che ha fra gli obiettivi quello di sopperire all'assenza dei decreti attuativi al D.Lgs. 192, prescrivendo l'obbligo di riferirsi alla Specifica tecnica UNI/TS 11300 Parti 1 e 2 per il calcolo del fabbisogno energetico degli edifici e mandando in deroga precedenti Norme UNI.



*Figura 1: Suddivisione dell'Italia in zone climatiche*

### 1.2.1 Il DPR 59/09 e le Linee Guida Nazionali

Finalmente, con 4 anni di ritardo, il 2 aprile 2009 viene pubblicato il DPR 59, decreto attuativo del D.Lgs. 192 e del D.Lgs. 311. Nel mese di giugno dello stesso anno il DPR 59/09 viene completato dalle "Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici".

Il DPR 59/09 introduce nuovi limiti di legge per quanto riguarda:

- prestazione energetica per il raffrescamento dell'edificio;
- la trasmittanza termica periodica per il controllo dell'inerzia dell'involucro opaco;
- precisazioni in merito ai valori di trasmittanza limite per le chiusure apribili dell'edificio (quali porte, finestre, ecc.);
- introduzione di limitazioni alla decentralizzazione degli impianti termici e disposizioni per un graduale passaggio alla contabilizzazione del calore in presenza di impianti di riscaldamento condominiali;
- nel caso di nuove costruzioni o di ristrutturazioni importanti di edifici dotati di generatori di calore alimentati da biomasse combustibili, sono stati introdotti dei requisiti specifici minimi inerenti il rendimento energetico, i limiti di emissione del generatore e l'isolamento dell'involucro edilizio;
- una valutazione di utilizzo, in presenza di ristrutturazioni di edifici esistenti, di sistemi schermanti o filtranti per le superfici vetrate sempre ai fini contenere l'oscillazione termica estiva negli ambienti;

Inoltre il decreto stabilisce che per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici si adottino le seguenti norme tecniche nazionali:

- UNI/TS 11300 – 1 Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale;
- UNI/TS 11300 – 2 Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria.

### 1.2.2 Requisiti delle prestazioni energetiche degli edifici

Di particolare interesse è l'art. 4, che definisce i criteri generali e requisiti delle prestazioni energetiche degli edifici ed impianti.

Per gli interventi di ristrutturazione o manutenzione straordinaria relativi all'involucro edilizio o ampliamento volumetrici minori del 20%, e che prevedono "a titolo esemplificativo e non esaustivo, rifacimento di pareti esterne, di intonaci esterni, del tetto o dell'impermeabilizzazione delle coperture" si applica:

- per le strutture opache verticali a ponte termico corretto il rispetto delle trasmittanze limite di cui all'Allegato C del DLgs 192/2005 (tabella 2.1), se il ponte termico non è corretto si fa riferimento alla trasmittanza media della parete, inclusi sottofinestre o aree limitate con riduzione di spessore (art.4 comma 4 lett. a) Nota bene, si comprendono negli interventi anche il rifacimento di intonaci esterni e l'impermeabilizzazione delle coperture, inoltre anche le strutture orizzontali verso garage o verso sottotetti non riscaldati devono rispettare tale limite;

Zona climatica	Dall' 1 gennaio 2006 U (W/m <sup>2</sup> K)	Dall' 1 gennaio 2008 U (W/m <sup>2</sup> K)	Dall' 1 gennaio 2010 U (W/m <sup>2</sup> K)
A	0,85	0,72	0,62
B	0,64	0,54	0,48
C	0,57	0,46	0,40
D	0,50	0,40	0,36
E	0,46	0,37	0,34
F	0,44	0,35	0,33

Tabella 1: Trasmittanza termica delle strutture opache verticali

- per le strutture opache orizzontali o inclinate a ponte termico corretto il rispetto delle trasmittanze limite di cui all'Allegato C del DLgs 192/2005 (tabelle 3.1 e 3.2), anche se verso ambienti non dotati di impianto di riscaldamento, se il ponte termico non è corretto si veda il punto precedente.



### 3.1 Coperture

Tabella 3.1 Valori limite della trasmittanza termica U delle strutture opache orizzontali o inclinate di copertura espressa in  $W/m^2K$

Zona climatica	Dall' 1 gennaio 2006 U ( $W/m^2K$ )	Dall' 1 gennaio 2008 U ( $W/m^2K$ )	Dall' 1 gennaio 2010 U ( $W/m^2K$ )
A	0,80	0,42	0,38
B	0,60	0,42	0,38
C	0,55	0,42	0,38
D	0,46	0,35	0,32
E	0,43	0,32	0,30
F	0,41	0,31	0,29

### 3.2 Pavimenti verso locali non riscaldati o verso l'esterno.

Tabella 3.2 Valori limite della trasmittanza termica U delle strutture opache orizzontali di pavimento espressa in  $W/m^2K$

Zona climatica	Dall' 1 gennaio 2006 U ( $W/m^2K$ )	Dall' 1 gennaio 2008 U ( $W/m^2K$ )	Dall' 1 gennaio 2010 U ( $W/m^2K$ )
A	0,80	0,74	0,65
B	0,60	0,55	0,49
C	0,55	0,49	0,42
D	0,46	0,41	0,36
E	0,43	0,38	0,33
F	0,41	0,36	0,32

Tabella 2: Trasmittanza termica delle strutture opache orizzontali o inclinate

Per nuove costruzioni, ristrutturazioni totali, parziali o manutenzione straordinaria, resta confermato il limite della trasmittanza delle strutture di separazione tra edifici o unità immobiliari o di separazione tra ambienti dotati di impianto di riscaldamento e ambienti non riscaldati, che deve essere minore di  $0,80 W/m^2K$ .

Allo stesso modo deve essere verificata l'assenza di condensazioni superficiali e interstiziali delle pareti opache con condizioni al contorno di umidità relativa interna pari al 65% e temperatura interna  $20^{\circ}C$ .

Tali valori vengono poi modificati dal D.M. dell'11 marzo 2008, che rende più stringenti quelli di cui era prevista l'applicabilità al gennaio 2010.

Infine, il D.M. del 26 gennaio 2010, “Aggiornamento del decreto 11 marzo 2008 in materia di riqualificazione energetica degli edifici”, modifica ulteriormente i valori di trasmittanza per le componenti dell'involucro edilizio, il cui rispetto è necessario per accedere alle detrazioni fiscali del 55% per gli interventi di riqualificazione energetica.

In tabella sono riportati i valori limite della trasmittanza termica U delle strutture componenti l'involucro edilizio attualmente vigenti, espressi in (W/m<sup>2</sup>K).

Zona climatica	Strutture opache verticali	Strutture opache orizzontali o inclinate		Chiusure apribili e assimilabili (**)
		Coperture	Pavimenti (*)	
A	0,54	0,32	0,60	3,7
B	0,41	0,32	0,46	2,4
C	0,34	0,32	0,40	2,1
D	0,29	0,26	0,34	2,0
E	0,27	0,24	0,30	1,8
F	0,26	0,23	0,28	1,6

Tabella 3: valori limite della trasmittanza termica U espressi in (W/m<sup>2</sup>K).

### 1.3 Considerazioni conclusive

Al di là di qualsiasi altra considerazione, le disposizioni del D.Lgs. 192/2005, così come corrette dal D.Lgs. 311/2006 e attuate dal DPR 59/2009, **rendono evidente la necessità di modificare il modo di costruire fino ad oggi adottato dovendosi prevedere, quale che sia la soluzione scelta, pareti verticali opache di maggiore spessore complessivo in grado di raggiungere i valori di trasmittanza, nonché di peso previsti dalla legge, oltre ad un maggiore isolamento termico delle chiusure orizzontali (coperture e solai) e delle chiusure trasparenti (vetri ed infissi).**

Questo presupporrà anche un inevitabile aumento dei costi iniziali di costruzione, con la possibilità però di risparmiare nel tempo in termini di consumo energetico.

In tale contesto sarà opportuno utilizzare prodotti innovativi, in grado di fornire performance termiche decisamente superiori rispetto a quelle dei blocchi tradizionali, per poter ottenere risultati di molto al di sotto degli standard minimi previsti dalla legge, anche per poter qualificare meglio l'edificio costruito, in modo che mantenga il suo valore nel futuro.



## **1.4 Attestato di Certificazione Energetica**

Si definisce Attestato di Certificazione Energetica il documento redatto in conformità delle Linee Guida emanate col Decreto Ministeriale del 26 giugno 2009 che introduce su tutto il territorio nazionale la Certificazione Energetica degli edifici; in particolare la normativa si applica a quelle regioni che non hanno ancora una propria legislazione. Nelle regioni che invece hanno approvato apposita normativa si applicano le disposizioni regionali.

L'attestato è un documento ufficiale, valido 10 anni, prodotto da un soggetto accreditato (certificatore energetico) e dai diversi organismi riconosciuti a livello locale e regionale.

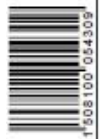
L'attestato energetico o "Attestato di Certificazione Energetica" è il documento che stabilisce in valore assoluto il livello di consumo dell'immobile inserendolo in una apposita classe di appartenenza. Più è bassa la lettera associata all'immobile, maggiore è il suo consumo energetico.

Gli obiettivi della certificazione energetica degli edifici sono i seguenti:

- migliorare la trasparenza del mercato immobiliare fornendo agli acquirenti ed ai locatari di immobili un'informazione oggettiva e trasparente delle caratteristiche e delle spese energetiche dell'immobile;
- informare e rendere coscienti i proprietari degli immobili del costo energetico relativo alla conduzione del proprio "sistema edilizio" in modo da incoraggiare interventi migliorativi dell'efficienza energetica della propria abitazione.

La certificazione consente agli interessati di ottenere dal fornitore/venditore di un immobile informazioni affidabili sui costi di conduzione, in modo da poter valutare se gli conviene spendere di più per un prodotto migliore dal punto di vista della gestione e manutenzione.

Inoltre dall'1 luglio 2009 è indispensabile per gli atti notarili di compravendita, oltre che parte della documentazione necessaria per l'accesso alle detrazioni del 55% sul reddito IRPEF.



ATTESTATO DI CERTIFICAZIONE ENERGETICA valido fino al 20/12/2019



# ATTESTATO DI CERTIFICAZIONE ENERGETICA

## Dati proprietario

Nome e cognome:  
 Ragione sociale: -  
 Indirizzo:  
 N. civico:  
 Comune:  
 Provincia:  
 C.A.P.:  
 Codice fiscale / Partita IVA:  
 Telefono:

## Catasto e energetico

Numero di protocollo:  
 Registrato il:  
 Valido fino al:

## Dati Soggetto certificatore

Nome e cognome:  
 Numero di accreditamento:

## Dati catastali

Sezione	Foglio		Particella		Categoria catastale		-
Subalterni	da	a	da	a	da	a	

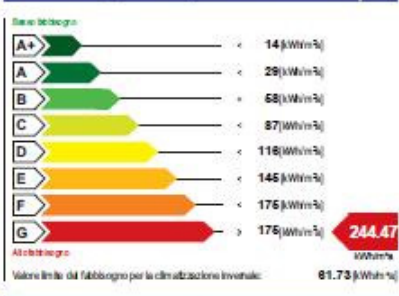
## Dati edificio

Provincia: **Milano**  
 Comune: **COLOGNO MONZESE**  
 Indirizzo: **Via per Vimodrone 6**  
 Periodo di attivazione dell'impianto: **16 ottobre - 16 aprile**  
 Gradi giorno: **2404 [°C]**  
 Categoria dell'edificio: **E.1(1)**  
 Anno di costruzione: **1961-1978**  
 Superficie utile: **60,23 [m²]**  
 Superficie disperdente (S): **90,72 [m²]**  
 Volume lordo riscaldato (V): **180,14 [m³]**  
 Rapporto S/V: **0,48 [m]**  
 Progettista architettonico: **N.D.**  
 Progettista impianto termico: **N.D.**  
 Costruttore: **N.D.**

## Mappa



## Classe energetica - EP<sub>in</sub> Zona climatica | E



## Classe energetica - ET<sub>e</sub>



## Richiesta rilascio targa energetica

Secondo quanto sancito al punto 11 della DGR VIII/5018 e s.m.i., si richiede, all'Organismo di accreditamento, il rilascio della targa

## Emissioni di gas ad effetto serra in atmosfera - CO<sub>2,e</sub>



Figura 2: Attestato di Certificazione Energetica della Regione Lombardia

Per redigere l'Attestato di Certificazione di un edificio o di una unità immobiliare è necessario avviare la Diagnosi Energetica o Energy audit, cioè la procedura sistematica volta ad acquisire adeguata conoscenza del profilo di consumo energetico di un edificio o di una unità immobiliare.

La Diagnosi Energetica consente di individuare le inefficienze e le criticità e di intervenire con le soluzioni a minor costo e maggior efficacia per la riduzione dei consumi energetici, individuando e quantificando le opportunità di risparmio energetico anche sotto il profilo dei costi/benefici.

La Diagnosi Energetica integra i dati raccolti sul campo, a seguito di sopralluoghi, con strumenti di calcolo (elaborazione di un modello matematico dell'edificio) attraverso i quali individuare e analizzare gli interventi di riqualificazione energetica dell'edificio o della unità immobiliare. A seguito della Diagnosi Energetica viene rilasciato l'Attestato di Certificazione Energetica.

## **1.5 L'Agenzia CasaClima**

Con l'introduzione dei decreti attuativi da parte di diverse regioni, si sono costituiti organismi che supervisionano i professionisti abilitati alla redazione dell'attestato energetico.

L'Agenzia CasaClima è un organo certificatore pubblico indipendente, accreditato nel 2005 come ente certificatore dalla Provincia di Bolzano. L'Agenzia offre inoltre programmi di formazione per tutti gli operatori coinvolti nella costruzione e promuove iniziative per sensibilizzare e responsabilizzare tutta la cittadinanza su risparmio energetico, sostenibilità e mutamenti climatici. Per divulgare questi temi e trovare delle soluzioni che li concretizzino, l'Agenzia collabora con i più importanti partner del settore, aziende ed istituzioni, sia in Italia che all'estero.

**Una CasaClima è innanzitutto un edificio in grado di assicurare un'alta efficienza energetica con conseguente risparmio di energia e riduzione dei costi per la climatizzazione. A questo si accompagnano sempre un alto standard qualitativo ed elevate condizioni di comfort per gli abitanti.**

La prima scelta da compiere insieme al progettista riguarda quindi lo standard energetico che si vuole raggiungere con la propria casa: una CasaClima Gold, A o B. Le classi energetiche CasaClima individuano separatamente il fabbisogno energetico per riscaldamento e l'energia complessiva impiegata.

La strategia per una progettazione che recepisca in pieno la filosofia CasaClima prevede infatti di:

- costruire un edificio in cui siano minimizzati i fabbisogni energetici (per riscaldamento, raffrescamento, illuminazione);
- coprire il fabbisogno energetico residuo con un'impiantistica moderna ed efficiente, che possibilmente impieghi fonti energetiche rinnovabili.

Le categorie CasaClima permettono di identificare il grado di consumo energetico di un edificio.

Esistono CasaClima Oro, CasaClima A e CasaClima B:

- il consumo di energia più basso è garantito da una CasaClima Oro, che richiede 10 kWh/m<sup>2</sup>anno, il che si può garantire, in pratica, anche in assenza di un sistema di riscaldamento attivo. La CasaClima Oro è anche detta “casa da un litro”, perché per ogni metro quadro necessita di un litro di gasolio o di un m<sup>3</sup> di gas l’anno;
- le case con un consumo di calore inferiore ai 30 kWh/m<sup>2</sup>anno sono invece classificate come CasaClima A, la cosiddetta “casa da 3 litri”, perché richiede 3 litri di gasolio o 3 m<sup>3</sup> di gas per metro quadro l’anno;
- CasaClima B è invece l’edificio che richiede meno di 50 kWh/m<sup>2</sup>anno. In questo caso si parla di “casa da 5 litri”, in quanto il consumo energetico comporta l’uso di 5 litri di gasolio o 5 m<sup>3</sup> di gas per metro quadro l’anno.



Figura 3: Categorie CasaClima



## **1.6 Normativa edilizia**

Ogni Comune è dotato di vari strumenti normativi che disciplinano gli aspetti dell'edilizia e dell'urbanistica del proprio territorio.

Per procedere all'effettiva costruzione di un edificio bisogna poi affidarsi alle competenze di un tecnico abilitato per ottenere i titoli previsti dai vari "uffici".

Il tecnico dovrà asseverare che il progetto sia corretto sotto tutti gli aspetti richiesti: conformità rispetto agli strumenti di regolazione e tutela del territorio, definizione dei requisiti di stabilità, igiene, sicurezza antincendio ed impiantistica.

In fase di progetto il tecnico dovrà eseguire opportuni calcoli strutturali per dimensionare gli elementi portanti, in funzione del materiale utilizzato e della tipologia strutturale adottata.

Si distinguono fondamentalmente due diversi tipi di struttura portante, cioè quella parte dell'edificio destinata a sostenere i carichi e le azioni esterne cui il manufatto è soggetto durante tutta la sua vita di esercizio, scaricandole tramite le fondazioni al terreno:

- struttura portante intelaiata: costituita da elementi strutturali quali pilastri e travi, opportunamente assemblati. L'elemento di chiusura perimetrale tra spazio interno e spazio esterno di tale struttura intelaiata che va a riempire i riquadri dei telai esterni è detto tamponatura, e non svolge alcuna funzione portante. pertanto la funzione portante è assicurata dal telaio strutturale e quella di separazione dalla tamponatura; i tramezzi, elementi divisori interni, risultano quindi non portanti;
- struttura portante continua, o muratura portante; in questo caso la muratura perimetrale ha sia funzione portante che di separazione tra spazio interno ed esterno.

Si fa riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni (Decreto Ministeriale del 14 gennaio 2008), che definiscono i principi per il progetto, l'esecuzione e il collaudo delle costruzioni, nei riguardi delle prestazioni loro richieste in termini di requisiti essenziali di resistenza meccanica e stabilità, anche in caso di incendio, e di durabilità.

Esse forniscono quindi i criteri generali di sicurezza, precisano le azioni che devono essere utilizzate nel progetto, definiscono le caratteristiche dei materiali e dei prodotti e, più in generale, trattano gli aspetti attinenti alla sicurezza strutturale delle opere.

Nelle Norme tecniche per le costruzioni si trovano i riferimenti per i materiali più comunemente usati in edilizia, vale a dire calcestruzzo, acciaio, legno e muratura. Nel caso si voglia costruire un edificio con struttura portante di un materiale diverso da questi, si fa riferimento all'art. 4.6, "Costruzioni di altri materiali", che cita: i materiali non tradizionali o non trattati nelle presenti norme tecniche potranno essere utilizzati per la realizzazione di elementi strutturali od opere, previa autorizzazione del Servizio Tecnico Centrale su parere del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, autorizzazione che riguarderà l'utilizzo del materiale nelle specifiche tipologie strutturali proposte sulla base di procedure definite dal Servizio Tecnico Centrale.

Si intende qui riferirsi a materiali quali calcestruzzi di classe di resistenza superiore a C70/85, calcestruzzi fibrorinforzati, acciai da costruzione non previsti in § 4.2, leghe di alluminio, leghe di rame, travi tralicciate in acciaio conglobate nel getto di calcestruzzo collaborante, materiali polimerici fibrorinforzati, pannelli con poliuretano o polistirolo collaborante, **materiali murari non tradizionali**, vetro strutturale, materiali diversi dall'acciaio con funzione di armatura da c.a.

Inoltre, l'art. 12, "Riferimenti tecnici", indica i documenti ritenuti coerenti con i principi del Decreto stesso:

- Eurocodici strutturali pubblicati dal CEN, con le precisazioni riportate nelle Appendici Nazionali o, in mancanza di esse, nella forma internazionale EN;

- Norme UNI EN armonizzate i cui riferimenti siano pubblicati su Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea;
- Norme per prove, materiali e prodotti pubblicate da UNI.

## **1.7 I prodotti da costruzione**

Si definiscono “prodotti da costruzione” tutti i materiali, i manufatti, gli impianti, che sono fabbricati per essere permanentemente incorporati in opere di costruzione (edifici ed opere di ingegneria civile).

La normativa di riferimento è la Direttiva 89/106/CEE (direttiva prodotti da costruzione), comunemente detta CPD (Construction Products Directive), recepita in Italia con il DPR n. 246 del 1993 e rimasta in vigore fino al 18 gennaio 2011.

Tale direttiva ha l'obiettivo di assicurare che i prodotti da costruzione che vengono immessi sul mercato nell'area dell'UE siano costruiti o realizzati dagli stati membri mediante medesimi standard di prodotto, in modo che l'opera di costruzione nella quale sono integrati rispetti alcuni requisiti ritenuti essenziali per la sicurezza, la salute e altre esigenze di ordine collettivo dell'utenza.

Come strumento di controllo, la Direttiva dispone che i produttori di materiali da costruzione, per poter commercializzare i loro prodotti in Europa, devono apporvi la marcatura CE, rispettando le relative norme armonizzate di prodotto. La sigla CE attesta appunto la conformità del prodotto stesso alla Direttiva prodotti da costruzione.



*Figura 4: Logo della marcatura CE*

La direttiva prodotti da costruzione rinvia a dei testi tecnici di attuazione che condizionano la messa sul mercato di un prodotto. Questi testi sono le norme armonizzate e rappresentano un lungo lavoro collettivo che permette di migliorare l'affidabilità di un prodotto, la qualità e la prevenzione dei rischi legati al suo utilizzo.

Non tutti i prodotti da costruzione sono interessati dalla CPD ma soltanto quelli devono essere permanentemente incorporati (per tutta la loro vita utile) nelle opere di costruzione intese come Edifici ed Opere di Ingegneria Civile.

Tra questi prodotti rientrano sia gli elementi base, quali gli inerti, il cemento, i solai, i pannelli isolanti, che i componenti quali le porte, le finestre, le vetrate, agli elementi di sicurezza antincendio quali gli evacuatori di fumo e calore, gli idranti, e per finire tutti gli accessori per la raccolta e la fornitura di acqua.

L' idoneità di prodotto si basa sui sei requisiti essenziali:

- resistenza meccanica e stabilità: l'opera deve essere concepita e costruita in modo che le azioni, cui può essere sottoposta durante la costruzione e l'utilizzazione, non provochino:
  - il crollo dell'intera opera o di una sua parte;
  - deformazioni di importanza inammissibile;
  - danni ad altre parti dell'opera o alle attrezzature principali o accessorie in seguito a una deformazione di primaria importanza degli elementi portanti;
  - danni accidentali sproporzionati alla causa che li ha provocati;
- sicurezza in caso d'incendio: l'opera deve essere concepita e costruita in modo che, in caso di incendio:
  - la capacità portante dell'edificio possa essere garantita per un periodo di tempo determinato;
  - la produzione e la propagazione del fuoco e del fumo all'interno delle opere siano limitate;
  - la propagazione del fuoco ad opere vicine sia limitata;
  - gli occupanti possano lasciare l'opera o essere soccorsi altrimenti;
  - sia presa in considerazione la sicurezza delle squadre di soccorso;
- igiene, salute, ambiente: l'opera deve essere concepita e costruita in modo da non compromettere l'igiene o la salute degli occupanti o dei vicini e in particolare in modo da non provocare:

- sviluppo di gas tossici;
  - presenza nell'aria di particelle o di gas pericolosi;
  - inquinamento o tossicità dell'acqua o del suolo;
  - difetti nell'eliminazione delle acque di scarico, dei fumi e dei rifiuti solidi o liquidi;
  - formazione di umidità su parti o pareti dell'opera;
- sicurezza nell'impiego: l'opera deve essere concepita e costruita in modo che la sua utilizzazione non comporti rischi di incidenti inammissibili, quali scivolate, cadute, collisioni, bruciature, folgorazioni, ferimenti a seguito di esplosioni;
  - protezione acustica: l'opera deve essere concepita e costruita in modo che il rumore, cui sono sottoposti gli occupanti e le persone situate in prossimità, si mantenga a livelli che rechino nocimento alla loro salute e tali da consentire soddisfacenti condizioni di sonno, di riposo e di lavoro;
  - risparmio energetico ed isolamento termico: l'opera e i relativi impianti di riscaldamento, raffreddamento e aerazione devono essere concepiti e costruiti in modo che il consumo di energia durante l'utilizzazione dell'opera sia moderato, tenuto conto delle condizioni climatiche del luogo, senza che ciò pregiudichi il benessere termico degli occupanti.

Il 18 gennaio 2011 il Parlamento Europeo, in seduta plenaria, ha approvato il Regolamento dei Prodotti da Costruzione (CPR-Construction Products Regulation) che sostituisce la Direttiva Prodotti da Costruzione 89/106/CE (CPD), fissando al contempo gli standard per la commercializzazione di tali prodotti all'interno dell'Unione Europea .

Tale regolamento ha applicazione immediata nei Paesi Membri, tuttavia alcune norme in esso contenute, saranno valide dal 1 luglio 2013, dando tempo alle aziende di adeguarsi.

## **1.8 Norme tecniche**

Nel seguito si farà riferimento ad una serie di norme tecniche dai molteplici codici identificativi, derivanti dai diversi enti o paesi che le hanno definite.

La Direttiva Europea 98/34/CE del 22 giugno 1998 definisce la “norma” come una specificazione tecnica approvata da un organismo riconosciuto ad attività normativa, per applicazione ripetuta o continua, la cui osservazione non sia obbligatoria, e che appartenga ad una delle seguenti categorie:

- **norma internazionale:** norma che è adottata da un’organizzazione internazionale di normalizzazione e che viene messa a disposizione del pubblico; la più importante organizzazione a livello mondiale per la definizione di norme tecniche è l’Organizzazione internazionale per la normazione (ISO). Le norme ISO sono numerate e hanno un formato del tipo “ISO 9999:yyyy: Titolo” dove “9999” è il numero della norma, “yyyy” l’anno di pubblicazione e “Titolo” è una breve descrizione della norma;
- **norma europea:** norma che è adottata da un organismo europeo di normalizzazione e che viene messa a disposizione del pubblico; tale organismo è il Comitato europeo di normazione (CEN), un ente normativo che ha appunto lo scopo di armonizzare e produrre norme tecniche (EN) in Europa in collaborazione con enti normativi nazionali e sovranazionali quali per esempio l’ISO. Gli standard europei prodotti dal CEN sono normalmente armonizzati e adattati dai singoli paesi che li accolgono;
- **norma nazionale:** norma che è adottata da un organismo nazionale di normalizzazione e che viene messa a disposizione del pubblico;
  - in l’Italia tale organismo è l’Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), un’associazione privata senza scopo di lucro che svolge attività normativa in tutti i settori industriali, commerciali e del terziario, ad esclusione di quello elettrotecnico ed elettronico di competenza del CEI. L’UNI

partecipa in rappresentanza dell'Italia all'attività normativa degli organismi internazionali di normazione ISO e CEN;

- in Germania è presente invece il Deutsches Institut für Normung (DIN), l'Istituto Tedesco per la Standardizzazione;
- per l'Austria è l'Austrian Standards Institute (ASI) ad adottare le norme, che prendono il nome di ÖNORMs.



**Parte seconda**

# **Le case di paglia**



## 2.1 Storia delle case di paglia

Le case di paglia nascono alla fine dell'800 negli Stati Uniti, per la precisione nello stato del Nebraska, in seguito all'invenzione della macchina imballatrice. In quella zona povera di pietre e legname infatti, i coloni, nell'attesa che la futura ferrovia portasse il materiale per costruire le case tradizionali, si adattarono ad utilizzare ciò che avevano: la paglia appunto.

I pionieri col passare del tempo si resero però conto che le loro case in paglia erano decisamente confortevoli, capaci di garantire un ottimo isolamento dagli inverni rigidi e dalle calde estati. Le case da provvisorie divennero permanenti, e molte di esse sono ancora abitate e resistenti tutt'ora: la più vecchia ha compiuto 100 anni nel 2003.



*Figura 5: The Burke House, ad Alliance, è la più vecchia casa esistente in Nebraska*

Dal punto di vista strutturale l'obiettivo di queste costruzioni era fondamentalmente quello di reggere il tetto, ovviamente oltre al peso proprio, con una struttura continua di paglia. Questo metodo viene oggi appunto chiamato "Nebraska style", o "load-bearing".

Con la costruzione di strade e ferrovie arrivano però materiali da costruzione più familiari, e le case di paglia cadono nel dimenticatoio fino a che, negli anni '80 alcuni ricercatori ripropongono la tecnica, apportandovi alcune modifiche per adeguarle alle esigenze moderne.

Le balle di paglia non sono più portanti, ma è una struttura in legno a reggere il peso del tetto, mentre la paglia viene usata solo come tamponamento.

Questo sistema viene detto appunto "metodo a tamponamento" o "post-and-beam" (letteralmente "pilastro e trave").

**“Nebraska style”**: sistema autoportante che non prevede alcuna struttura di sostegno: le balle vengono fissate alle fondazioni e collegate tra loro con paletti di legno. In sommità viene realizzato un cordolo di legno per la distribuzione di carichi del tetto; le aperture vengono inserite in controtelai, agganciati alle balle con paletti di legno;



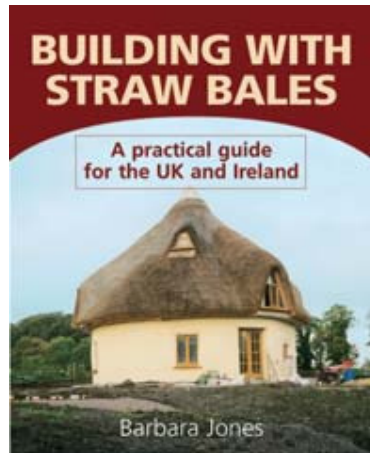
*Figura 6: Costruzione di una casa "Nebraska style", con parete di paglia portante*

**“Post and beam”**: la struttura portante è di legno, mentre le balle vengono posate come tamponatura. In questo modo si può alzare il tetto prima dei muri: è dunque possibile mantenere le balle asciutte durante il processo, fino alla posa dell’intonaco.



*Figura 7: Costruzione di una casa "post and beam" che struttura portante in legno*

L'idea di costruire con la paglia viene importata in Europa da Barbara Jones, che la adatta alle diverse esigenze climatico-ambientali. Nel 1994 viene costruita la prima casa in paglia in Gran Bretagna.



*Figura 8: Il libro di Barbara Jones "Building with straw bales"*

Oggi il numero di edifici in balle di paglia in tutto il mondo e in Italia è in costante aumento.



*Figura 9: Casa di paglia "La Boa" a Pramaggiore (VE)*

Nonostante il naturale scetticismo sulla durata e sulla tenuta delle pareti di paglia, molti sono gli studi specialmente negli Stati Uniti e in Canada che dimostrano i grandi vantaggi degli edifici in balle di paglia.

## 2.2 La paglia come materiale da costruzione

In questo capitolo viene analizzata la paglia come materiale da costruzione, e la sua risposta a test standard che ne quantificano le caratteristiche e ne certificano la qualità.

La paglia è un materiale di scarto della produzione di cereali (grano, orzo, segale, aveva, riso, ecc.); è lo stelo della pianta morta, e ha una composizione chimica simile al legno. E' diversa dal fieno, che è invece erba verde essiccata che contiene quindi foglie, fiori e semi.

Può essere pressata e impiegata per molteplici scopi: lettieri dei bovini nelle stalle, coadiuvare una razione alimentare per aumentarne il volume e la sensazione di sazietà dell'animale, o nella fabbricazione della carta.

In realtà spesso la paglia oggi non viene raccolta, quando non risulta conveniente economicamente. In questo caso viene interrata con le lavorazioni di preparazione del terreno per la successiva coltura, contribuendo ad aumentare la sostanza organica del terreno.

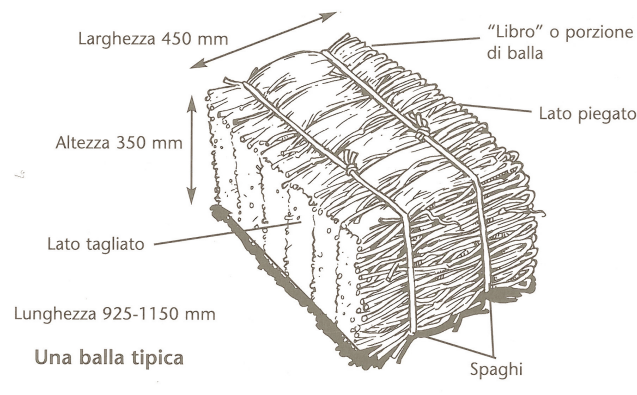


Figura 10: Dimensioni tipiche di una palla di paglia

Le balle posso essere disposte in due modi:

- di piatto ("on flat"), cioè con il lato maggiore parallelo al terreno e quindi il lato tagliato parallelo alla parete;
- di taglio ("on edge"), cioè con il lato tagliato parallelo al terreno.

## 2.3 Umidità e permeabilità al vapore

L'acqua in tutte le sue forme è tra i peggiori pericoli per l'edificio; la formazione di muffe sulle superfici umide può rivelarsi un pericolo per la salute degli abitanti e allo stesso tempo un fattore di degrado della materia costruttiva.

In questa parte non verranno presi in considerazione i fenomeni relativi ad infiltrazioni vere e proprie di acqua (superabili con soluzioni progettuali e tecnologiche: cornicioni, impermeabilizzazioni, sicurezza della tenuta degli impianti, ecc.), bensì si analizzeranno le problematiche relative all'acqua contenuta nell'aria (umidità, vapori di condensa), vale a dire acqua allo stato vapore, sempre presente seppur a diverse concentrazioni.

L'aria infatti può contenere vapore in quantità variabili in funzione della temperatura: più l'aria è calda, più quantità di vapore può contenere.

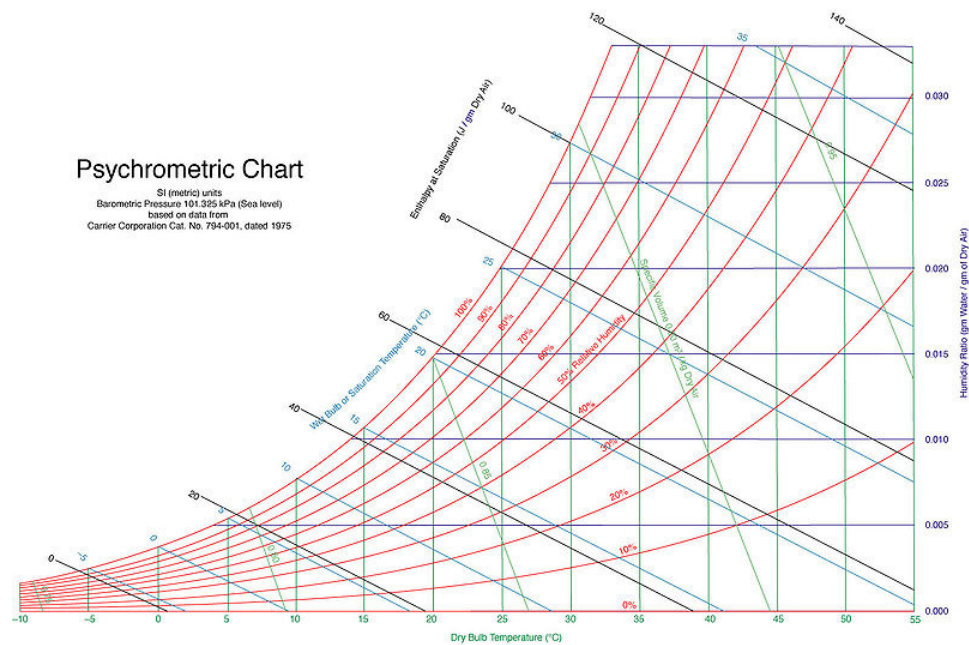


Figura 11: Diagramma psicrometrico

Richiamiamo la definizione di alcuni parametri:

- umidità assoluta: è la quantità di acqua espressa in grammi contenuta in un metro cubo d'aria ( $\text{g}/\text{m}^3$ );
- umidità massima: è la quantità massima di acqua che un  $\text{m}^3$  di aria può contenere ad una certa temperatura ( $\text{g}/\text{m}^3$ );
- umidità relativa (Relative Humidity, RH): indica la quantità di acqua contenuto nell'aria, in percentuale, rispetto alla quantità massima di acqua che l'aria potrebbe contenere ad una certa temperatura (%). Un'umidità relativa del 100% indica che l'aria contiene la massima quantità possibile di acqua per le date condizioni di temperatura e pressione.

All'interno di una abitazione, attività come cucinare, asciugare il bucato, farsi una doccia, o la presenza di piante e delle stesse persone, porta ad un aumento di umidità che diminuisce il comfort e crea le condizioni favorevoli per la formazione delle muffe, se non opportunamente smaltita.

Se la maggior parte di questa umidità viene eliminata grazie ad una buona ventilazione (da qui l'importanza di un costante ricambio di aria tramite "apertura di finestre", e un'appropriata distribuzione di queste), è anche vero che una parte migra per diffusione attraverso i muri.

Infatti al variare delle condizioni termoigrometriche (temperatura, umidità relativa) di due ambienti separati da una parete si generano pressioni parziali di vapore diverse che sono causa di un flusso d'aria umida attraverso il mezzo di separazione, nel senso che va dalla pressione parziale più elevata alla pressione parziale meno elevata. In inverno, quando la pressione del vapore è maggiore all'interno, la migrazione va dall'interno all'esterno; in estate viceversa dall'esterno all'interno.

E' importante quindi capire come e perché i materiali che compongono un muro traspirino e debbano traspirare: per traspirabilità di un materiale infatti si intende proprio la sua capacità ad essere attraversato dall'aria umida.

La paglia è per la sua stessa natura un materiale molto traspirante, ma, se su di essa si applica un rivestimento non traspirante, si avrà un fenomeno di



condensazione dietro al rivestimento stesso. Questo porta a sviluppare una serie di problemi: innanzitutto una minore durabilità delle pareti, in quanto l'acqua che verrebbe a formarsi sulla paglia la farebbe marcire; inoltre se l'aria in condizioni stagnanti è un buon isolante termico e acustico, è pur vero che perde queste sue proprietà in presenza di acqua liquida.

In conclusione si può affermare che è di fondamentale importanza evitare la presenza di acqua all'interno del muro, che porterebbero ad un triplice aspetto negativo: marciume della paglia, macchie di muffa sulle pareti e riduzione dell'isolamento termico e acustico.

Sono diversi gli studi svolti su questi argomenti, in particolare si fa riferimento a 4 diversi articoli scritti tra il 1996 e il 2000 dall'ente canadese CMHC (Canada Mortgage and Housing Corporation):

- 1996, “Straw bale moisture sensor study”: lo scopo del ricercatore Don Fugler è quello di creare un sensore per il monitoraggio dell'umidità dei muri in balle di paglia che sia economico e facile da usare;
- 1997, “Pilot Study of Moisture Control in Stuccoed Straw Bale Walls”, che presenta i risultati di un lavoro pilota sulle prestazioni fornite da una casa in balle di paglia nei confronti dell'umidità;
- 2000, “Straw Bale House Moisture Research”, che approfondisce lo studio pilota di cui sopra, ricercando il contenuto di umidità nelle pareti in paglia sia delle case nuove che di quelle più vecchie, e sfruttando fra l'altro i sensori messi a punti nello studio del 1996 riportato sopra;
- 2000, “Moisture Properties of Plaster and Stucco for Straw bale Buildings”, che basandosi sullo standard statunitense ASTM E96 valuta la permeanza dei diversi tipi di intonaci abitualmente usati in edilizia, indagando anche sull'influenza di impermeabilizzanti e altri prodotti sintetici.

### 2.3.1 Proprietà dell'intonaco

Per quanto detto, appare evidente che il tipo di intonaco e altri eventuali interventi di finitura risultano determinanti nella valutazione della traspirabilità di una parete.

Ogni materiale ha una propria capacità nel far passare più o meno vapore d'acqua; si introducono quindi alcuni parametri, riguardanti appunto la risposta del materiale al vapore:

- **permeanza al vapor d'acqua:** è la trasmissione di vapor d'acqua attraverso uno spessore conosciuto di un dato materiale sotto condizioni definite;
- **permeabilità al vapor d'acqua:** è la quantità di vapor d'acqua che passa attraverso uno spessore unitario, normalmente un metro, nell'unità di tempo in condizioni di pressione stabilite;

I risultati della ricerca del 2000 “Moisture properties of plaster and stucco for straw bale buildings”, curata da Don Fugler e John Straube, vengono riportati di seguito.

Le prove si sono svolte applicando diversi tipi di intonaci direttamente sulle balle di paglia, e conducendo quindi su di esse dei test di permeanza al vapore e prove di capillarità.

La permeanza al vapore è stata misurata utilizzando una procedura simile all'ASTM E96, adattata ad un campione che ha un'umidità relativa del 75% all'esterno e del 100% all'interno (e quindi un'umidità media dell'87,5%). Tali condizioni simulano una condizione di una balla di paglia bagnata all'interno, che va via via asciugandosi verso l'esterno, in un clima comunque umido.

La capillarità invece viene misurata attraverso un test di assorbimento dell'acqua, secondo lo standard europeo CEN/TC 89/WG 10, che consiste nell'immergere il campione in 1÷2 mm d'acqua, misurando l'aumento di peso in punti diversi per 24 ore.

Di seguito si riporta la tabella con i risultati.

Campione	Spessore [mm]	Permeanza [ng/Pa·s·m <sup>2</sup> ]	Permeabilità [ng/Pa·s·m]	Capacità di assorbimento [kg/m <sup>2</sup> ·s <sup>1/2</sup> ]
<b>Cemento:Sabbia</b>				
A - <u>1:3 Cemento:Sabbia</u>	43,5	39	1,7	0,0380
A1 - A con vernice elastomerica	39,5	40	-	0,0085
A2 - A con vernice al silossano	41,0	40	-	0,0004
<b>Cemento:Calce:Sabbia</b>				
B - <u>1:1:6 Cemento:Calce:Sabbia</u>	35,0	295	10,3	0,0920
B1 - B con vernice all'olio di lino	36,0	223	8,0	0,0670
B2 - B con vernice elastomerica	32,5	244	-	0,0150
B3 - B con vernice al silossano	41,0	203	8,3	0,0006
B4 - B con stearato di calcio (2%)	53,5	81	4,3	0,1010
B5 - B con vernice a base di lattice	36,5	203	-	0,0200
B6 - B con vernice all'olio di alkyd	40,0	41	-	0,0140
C - <u>1:2:9 Cemento:Calce:Sabbia</u>	50,5	295	14,9	0,1100
C1 - C con vernice all'olio di lino	50,5	259	13,1	0,1050
<b>Calce:Sabbia</b>				
D - <u>1:3 Calce:Sabbia</u>	33,5	565	18,9	0,1270
D1 - D ma con calce idrata	32,0	459	14,7	0,1610

Tabella 4: Risultati dei test di permeanza

Tramite i valori di permeanza è poi possibile dedurre altri parametri, normalmente più utilizzati nella pratica progettuale:

- **fattore di resistenza alla diffusione del vapore  $\mu$** : indica quanto un materiale è più resistente al passaggio del vapore rispetto ad uno spessore equivalente di aria ferma. Valori di  $\mu$  elevati indicano un materiale poco permeabile alla diffusione del vapore (non traspirante), mentre valori bassi un materiale aperto o permeabile (traspirante);
- **valore Sd**: rappresenta lo spessore d'aria equivalente alla diffusione del vapore in metri e si ottiene moltiplicando il valore  $\mu$  per lo spessore del materiale; è utile per poter paragonare la resistenza dei diversi strati:

più è alto il valore Sd minore è la permeabilità alla diffusione del vapore di un elemento costruttivo.

Per il calcolo di questi parametri, si è operato come segue:

$$\mu = \frac{p_a}{p} \quad \text{e} \quad Sd = \mu \cdot \text{spessore}$$

dove:

- $p_a = 187,52 \cdot 10^{-12} \frac{kg}{Pa \cdot m \cdot s}$  è la permeabilità dell'aria;
- $p$  è la permeabilità del materiale.

I valori di  $\mu$  e Sd vengono riportati in Tabella 2:

Campione	$\mu$	Sd [m]	Capacità di assorbimento [kg/m <sup>2</sup> ·s 1/2]
<b>Cemento:Sabbia</b>			
A - <u>1:3 Cemento:Sabbia</u>	111	4,8	0,0380
A1 - A con vernice elastomerica	119	4,7	0,0085
A2 - A con vernice al silossano	114	4,7	0,0004
<b>Cemento:Calce:Sabbia</b>			
B - <u>1:1:6 Cemento:Calce:Sabbia</u>	18	0,6	0,0920
B1 - B con vernice all'olio di lino	23	0,8	0,0670
B2 - B con vernice elastomerica	24	0,8	0,0150
B3 - B con vernice al silossano	23	0,9	0,0006
B4 - B con stearato di calcio (2%)	43	2,3	0,1010
B5 - B con vernice a base di lattice	25	0,9	0,0200
B6 - B con vernice all'olio di alkyd	114	4,6	0,0140
C - <u>1:2:9 Cemento:Calce:Sabbia</u>	13	0,6	0,1100
C1 - C con vernice all'olio di lino	14	0,7	0,1050
<b>Calce:Sabbia</b>			
D - <u>1:3 Calce:Sabbia</u>	10	0,3	0,1270
D1 - D ma con calce idrata	13	0,4	0,1610

Tabella 5: Valori di  $\mu$  e Sd

La permeanza al vapore dell'intonaco cemento:sabbia (A) è piuttosto bassa; ciò significa che la paglia si secca abbastanza lentamente. L'aggiunta di calce (B) porta ad un aumento significativo della permeanza, ma aumenta anche l'assorbimento di acqua. Un intonaco di sola calce (D) è invece circa 10 volte più permeabile di quello di cemento.

Il trattamento con vernice all'olio di semi di lino ha un piccolo ma benefico effetto sull'assorbimento d'acqua sia nel campione B1 (1:1:6) che nel C1 (1:2:9); d'altro canto però riduce un po' la permeanza. Andrebbero comunque svolte altre ricerche con strati più spessi di vernice.

Le vernici testate sono decisamente consigliabili visti i risultati dello studio: sia quelle elastomeriche che quelle al silossano infatti riducono praticamente a zero l'assorbimento di acqua, a fronte di una riduzione minima della permeanza. Si tenga però in considerazione che le prestazioni di questi prodotti dopo qualche anno di esposizione agli agenti atmosferici è ancora da verificare. Utilizzare lo stearato di calcio come additivo da un lato comporta una riduzione sensibile della permeanza del campione, ma dall'altro non riduce l'assorbimento di acqua: quindi si può dire che il suo utilizzo non comporta vantaggi.

### 2.3.2 Metodologie per la misura di umidità

Nello studio del 1996 vengono sviluppate tre diverse metodologie, economiche ma comunque abbastanza accurate per l'uso casalingo, per misurare il contenuto di umidità nei muri.

Il primo metodo consiste nel modificare un comune igrometro elettronico allungando i sensori, che vengono posti all'interno del muro, nella balla di paglia, mentre il display si attacca al muro.

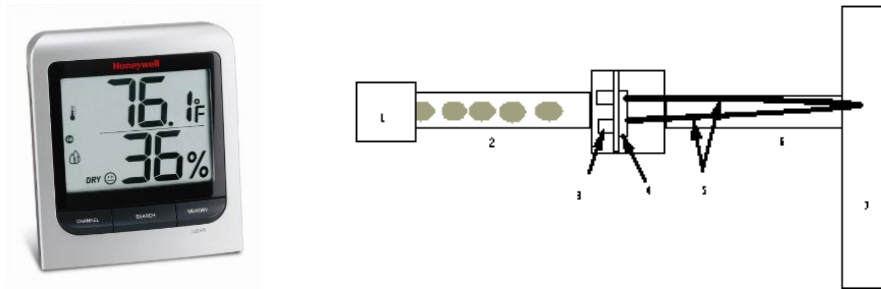


Figura 12: Igrometro modificato

La figura 12 rappresenta lo schema dell'igrometro modificato:

1. testata di chiusura;
2. tubo perforato in CPVC, coperto con un filtro da caffè;
3. sensori;
4. piastra di montaggio;
5. cavi di collegamento al display;
6. tubo in CPVC;
7. display.

Il sensore misura sia la temperatura che l'umidità relativa, in un range dal 35% al 90%, visualizzando questi dati in continuo sul monitor.

Nel secondo metodo si utilizza invece un misuratore di umidità del legno, sfruttando il fatto che la conduttività del legno è funzione dell'umidità relativa nelle balle di paglia, e quindi del contenuto di acqua nella paglia.

Lo strumento, contenente dei dischi di balsa o abete bianco, viene posizionato al centro della balla, e lasciato lì fino a che non raggiunge l'equilibrio con la paglia.

Uno schema della sonda utilizzata è rappresentato in figura 13.

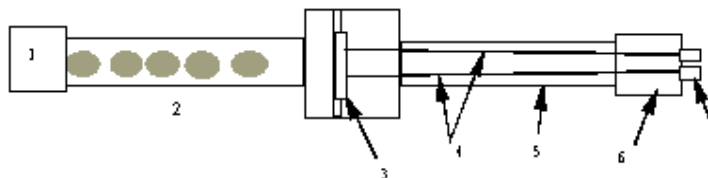


Figura 13: Sonda per la misura di umidità nel legno

1. testata di chiusura;
2. tubo perforato in CPVC, coperto con un filtro da caffè;
3. disco di legno (3 mm circa di spessore), a cui sono collegati i cavi tramite viti di acciaio;
4. cavi di collegamento al display;
5. tubo in CPVC;
6. testata di chiusura;
7. sensori.

Gli esperimenti mostrano che esiste una buona correlazione tra la conduttività dei blocchi di legno, l'RH e il contenuto di umidità paglia.

Infine il terzo metodo prevede misure dirette su un campione di paglia. Si è infatti prelevato un campione di circa 10 g, lo si è pesato, quindi lo si è posto all'interno di un foglio di carta stagnola forato (di peso noto) e messo in forno a 120 °C per 4-6 ore. La differenza di peso tra il campione umido e quello essiccato rappresenta quindi l'umidità.

$$Umidità = \frac{C_W - C_D}{C_D - F}, \text{ dove:}$$

- $C_W$  è il peso del campione bagnato avvolto nella stagnola;
- $C_D$  è il peso del campione secco avvolto nella stagnola;
- $F$  è il peso del foglio di stagnola.

Serve molta cura nella scelta del campione, che deve essere rappresentativo dell'umidità media della balla; infatti, soprattutto a livelli di bassa umidità (<50%), ci possono essere variazioni significative fra un punto e l'altro.

Il campione secco viene quindi reinserito al suo posto nel muro, e lasciato lì fino a torna in equilibrio con l'umidità presenta nella balla, funzionando da sensore.

### 2.3.3 Conclusioni sulla strumentazione

Gli studi sul campo mostrano che igrometri (primo metodo) e sonde (secondo metodo) per la determinazione del contenuto di umidità hanno entrambi la loro utilità, ma anche certi limiti.

I primi reagiscono più rapidamente dei secondi, e sono facili da leggere perché funzionano in continuo; le criticità riguardano la capacità dei sensori di sopravvivere in un ambiente umido.

Le sonde richiedono poi uno strumento per leggere il contenuto di umidità del blocco di legno; ottenuto tale valore, il proprietario può calcolare il contenuto di umidità nella paglia. Dal momento che il contenuto di umidità cambia più lentamente rispetto all'umidità relativa, queste sonde dovrebbero rappresentare un modo più realistico per accorgersi del pericolo per la paglia. Sono disponibili dei fattori di correzione a seconda della specie di legno utilizzato e della temperatura.

Lo studio ha però mostrato che la maggior parte delle persone non effettua la lettura correttamente, ad esempio non utilizza i fattori di correzione, e quindi soprattutto nei periodi molto freddi, ci possono essere errori anche di parecchi punti percentuali.

Forse sarebbe meglio limitarsi a delle letture più approssimate, ma di più facile interpretazione per gli utenti:

- paglia molto secca;
- paglia bagnata;
- paglia a rischio e che necessita di una ispezione più accurata.



#### 2.3.4 Risultati dei test

Lo studio del 2000 del CMHC ha controllato le condizioni di diversi gruppi di case, utilizzando i metodi e gli strumenti esaminati in precedenza.

In particolare, utilizzando igrometri e sonde per l'umidità del legno, sono state monitorate 22 case di recente costruzione, negli USA e in Canada.

Nelle case controllate le pareti di paglia erano di solito abbastanza asciutte, sia a metà balla che sotto all'intonaco esterno, e quindi mai a rischio di formazione di marciume.

Si prende però atto che:

- le case monitorate sono comunque un numero relativamente basso;
- il sistema di costruzione con balle di paglia è ancora in rapida evoluzione, con dettagli costruttivi e materiali in cambiamento, per cui i dati vanno continuamente aggiornati.

È quindi importante installare nei muri degli strumenti per il monitoraggio, economici e facilmente reperibili o costruibili.

## **2.4 Resistenza al fuoco**

Una delle prime domande che viene in mente quando si pensa alle case di paglia è: e se prende fuoco?

E' intuitivo pensare che un muro di paglia bruci bene, essendo la paglia molto infiammabile. Tuttavia, il fuoco richiede comburente oltre a combustibile, e la paglia, estremamente compressa nelle balle, riduce drammaticamente la capacità dell'ossigeno di alimentare la fiamma. La superficie a contatto con il fuoco si carbonizza, ma poi la brace resta a covare sotto la cenere, evitando una combustione rapida.

Inoltre le pareti del muro sono intonacate, il ché garantisce un'ulteriore protezione alle fiamme.

Il codice edilizio in vigore in Italia dal 2007 esprime la sicurezza agli incendi in funzione di "resistenza al fuoco", cioè la capacità di una costruzione, di una parte di essa o di un elemento costruttivo di mantenere, per un tempo prefissato:

- la resistenza R: attitudine a conservare la resistenza meccanica sotto l'azione del fuoco;
- l'ermeticità E: attitudine a non lasciar passare, né produrre, se sottoposto all'azione del fuoco su un lato, fiamme, vapori o gas caldi sul lato non esposto;
- l'isolamento termico I: attitudine a ridurre la trasmissione del calore.

Con il simbolo REI (seguito da un numero n) si identifica un elemento costruttivo che deve conservare per un tempo determinato n, espresso in minuti, la resistenza meccanica, la tenuta alle fiamme e ai gas caldi, l'isolamento termico.

La normativa italiana prevede che sia obbligatorio presentare una pratica antincendio solo nei casi di edifici di particolare importanza, mentre non è necessaria nel caso di civile abitazione a meno che questa sia di un'altezza superiore ai quattro piani.

**In generale, una volta che il muro è stato intonacato su entrambi i lati, la combinazione tra una superficie incombustibile e un interno isolante che non brucia bene rendono la parete in balle di paglia una struttura molto resistente al fuoco.**

Questo è stato verificato con una serie di test svolti in diversi paesi prima del 2002, e raccolti nell'articolo "Straw bale fire safety" del 2003.

Nell'articolo si fa riferimento al test ASTM E-119: Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials (l'ASTM: American Society for Testing and Materials, è leader riconosciuto a livello mondiale nello sviluppo e nella fornitura di standard internazionali).

Il test standard fornisce la misura della trasmissione del calore e della trasmissione di gas caldi attraverso il provino; per gli elementi portanti, la misurazione della capacità di carico del provino durante l'esposizione di prova, mentre per i singoli membri portanti quali travi e colonne la misurazione della capacità di carico sotto l'esposizione di prova, considerando anche le condizioni di sostegno (trattenuto o non trattenuto).

Come per il REI, il muro viene poi classificato in base al tempo di resistenza al fuoco.

Si riportano di seguito i 5 test a cui si è fatto riferimento:

- 1993, New Mexico; sono stati svolti 2 diversi test:
  - nel primo test si è sottoposta una parete di balle, senza intonaco, a 920 °C per 30 minuti; quando il test è stato interrotto meno della metà della palla era carbonizzata;
  - nel secondo test invece si è sottoposta una parete di balle intonacata a 2 ore di fiamma a 1060 °C, e si è misurato l'incremento di temperatura sul lato opposto al fuoco. Alla fine del test l'aumento è stato di 12 °C circa;
- 1996, California; il test ASTM E-119 svolto dalla University of California Richmond Field Station ha facilmente superato i criteri richiesti per classificare il muro "da 60 minuti". Secondo il parere degli esperti presenti alla prova, il muro probabilmente sarebbe passato anche come una struttura "da 120 minuti";

- 2001, Vienna; il gruppo Appropriate Technology Group (GrAT) del Vienna Technical Institute ha condotto una prova F90 (simile alla ASTM E-119), che ha valutato un muro di balle di paglia intonacato in 90 minuti;
- 2001, Danimarca; il Danish Fire Technical Institute ha testato un muro di balle di paglia intonacato con fuoco sul lato esposto a 1000 °C; la struttura è stata valutata in 30 minuti, con aumento di temperatura del lato non esposto di un solo grado. L'aumento medio massimo consentito per superare quella prova sarebbe stato 80 °C;
- 2002, Australia; membri della AUSBALÉ hanno testato singolarmente balle intonacate allo standard australiano, simulando il calore di un incendio boschivo. Sottoposto ad un calore massimo di intensità di 29 kilowatt per metro quadrato, nessuna delle nove balle intonacate si è accesa, né ha sviluppato crepe visibili. Secondo il responsabile, questo li qualifica come non combustibili sotto l'attuale Australian Bushfire Code AS 3959.

Inoltre un ulteriore studio svolto nel 2003 al Politecnico di Braunschweig, in Germania, ha classificato un muro di paglia come R30-90.

In conclusione, la conoscenza delle proprietà di resistenza al fuoco dei muri in balle di paglia è ancora incompleta, ma i test e le esperienze svolte sul campo fino ad oggi sono stati molto incoraggianti.

Ad oggi la maggior parte degli incendi delle case di paglia sono avvenuti in fase di costruzione, legati ad attività quali ad esempio la saldatura o la molatura, e con pareti non ancora intonacate e molta paglia sciolta sparsa per terra.

E' fondamentale quindi che si diffonda la conoscenza delle misure di sicurezza di base per i cantieri di questo tipo: pulire spesso (2-4 volte al giorno) la zona dalla paglia sciolta, ridurre al massimo gli spazi e le crepe fra una balla e l'altra, che rappresenta la zona più critica di passaggio della fiamma e intonacare il prima possibile.

## 2.5 Isolamento termico

L'isolamento termico dell'involucro rappresenta la strategia fondamentale che si ha a disposizione per ridurre in modo significativo le perdite energetiche dell'edificio, cui si deve sempre dare priorità, sia nelle nuove costruzioni che negli interventi sull'esistente.

L'isolamento termico permette infatti di ridurre il flusso di calore dall'interno verso l'esterno o verso gli ambienti non riscaldati durante il periodo freddo, e quindi di limitare il dispendio energetico per mantenere la temperatura interna a livelli di comfort.

Il compito fondamentale dell'isolante termico è quello di ostacolare e quindi rallentare il flusso di calore attraverso gli elementi disperdenti dell'involucro: pareti, tetto, pavimento controterra, finestre.

Per quantificare il calore che viene disperso, in regime invernale, attraverso un elemento costruttivo (pareti, tetto, solaio) è necessario far riferimento sia ad alcune grandezze fisiche proprie dei singoli materiali che lo compongono, sia a delle grandezze in grado di misurare il comportamento complessivo dell'intero elemento. Materiali ed elementi costruttivi diversi si comportano infatti in modo differente nei confronti del passaggio di calore, ossia possono più o meno ostacolarlo. Si definiscono:

- **conducibilità termica  $\lambda$**  (o conduttività termica): è una caratteristica propria di un materiale. Esprime quanta energia riesce a fluire attraverso il materiale che si sta valutando; se un materiale ha un valore  $\lambda$  molto basso è un ottimo coibente. Si misura in  $W/(m \cdot K)$ . In altri termini, la conducibilità termica è una misura dell'attitudine di una sostanza a trasmettere il calore;
- **trasmissione termica  $U$** : non è una caratteristica del materiale come la conduttività termica, ma è invece la caratteristica dell'elemento costruttivo progettato.  $U$  indica quanta energia attraversa l'elemento costruttivo che abbiamo progettato: un valore di  $U$  molto basso indica un ottimo elemento costruttivo. La trasmissione si misura in  $W/(m^2 \cdot K)$ ,

indica cioè quanti Watt di energia vengono dispersi attraverso 1 m<sup>2</sup> per una differenza di temperatura di 1 K tra dentro e fuori.

In generale materiali ad alta densità come il calcestruzzo o i metalli sono buoni conduttori del calore; i materiali porosi e leggeri hanno invece migliori capacità isolanti.

Con il termine materiale isolante sono indicati tutti i materiali con un valore di  $\lambda < 1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ; generalmente i materiali isolanti comunemente utilizzati dall'Agenzia CasaClima hanno valori di  $\lambda < 0,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ .

<b>Materiale</b>	<b><math>\lambda \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}</math></b>
Poliuretano	0,03
Fibra di cellulosa	0,04
Lana di pecora	0,04
Polistirolo	0,04
Sughero	0,04
Fibra di legno	0,05
Mattone forato	0,4
Mattone pieno	0,7
Calcestruzzo	2,3

Tabella 6: Conducibilità termica di alcuni materiali edili

La norma di riferimento per il calcolo della trasmittanza termica è la UNI EN ISO 6946:1999.

Il valore di U di un elemento costruttivo si ottiene calcolando l'inverso della resistenza totale  $R_T$  e dipende quindi dal valore  $\lambda$  dei materiali che compongono l'elemento, dai relativi spessori e dalle resistenze termiche superficiali;

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{si} + \frac{S_1}{\lambda_1} + \dots + \frac{S_n}{\lambda_n} + R_{se}}$$

dove:

- $R_{si}$  e  $R_{se}$  sono le resistenze termiche superficiali rispettivamente interna ed esterna, e rappresenta quella resistenza dovuta a piccoli strati d'aria in prossimità della parete che il calore deve superare prima di entrare o uscire dall'elemento. Questi valori sono normati nella UNI EN ISO

6946 a seconda della direzione del flusso di calore; si può comunque assumere:

- $R_{si} = 0,13 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;
- $R_{se} = 0,04 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;
- $S$  è lo spessore dello strato in metri;
- $\frac{S_n}{\lambda_n}$  è la resistenza termica al passaggio del calore dello strato n-esimo di materiale omogeneo.

Il D.M. del 26 gennaio 2010 sulla riqualificazione energetica degli edifici stabilisce i valori limite della trasmittanza termica  $U$ , espressi in  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , e riportati in tabella.

Zona climatica	Strutture opache verticali	Strutture opache orizzontali o inclinate		Chiusure apribili e assimilabili (**)
		Coperture	Pavimenti (*)	
A	0,54	0,32	0,60	3,7
B	0,41	0,32	0,46	2,4
C	0,34	0,32	0,40	2,1
D	0,29	0,26	0,34	2,0
E	0,27	0,24	0,30	1,8
F	0,26	0,23	0,28	1,6

Figura 14: valori limite della trasmittanza termica  $U$  espressi in  $(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

Supponiamo ora di trovarci nella zona climatica D, e di dover quindi dimensionare una parete di materiale omogeneo in modo che abbia trasmittanza  $U \geq 0,29 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

Consideriamo 2 materiali diversi, polistirolo espanso con  $\lambda = 0,045 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  oppure calcestruzzo armato con  $\lambda = 2,3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ .

Nel caso del polistirolo espanso avremo:

$$U = \frac{1}{R_{si} + \frac{S}{\lambda_{p.e.}} + R_{se}} \rightarrow 0,29 = \frac{1}{0,13 + \frac{S}{0,045} + 0,04} \rightarrow S \approx 0,15 \text{ m}$$

Nel caso del calcestruzzo armato invece:

$$U = \frac{1}{R_{si} + \frac{S}{\lambda_{cls}} + R_{se}} \rightarrow 0,29 = \frac{1}{0,13 + \frac{S}{2,3} + 0,04} \rightarrow S \approx 7,54 \text{ m}$$

Questo significa che 15 cm di isolante proteggono dal freddo come 7,5 m di calcestruzzo armato!

Appare dunque chiara l'importanza dell'isolamento termico durante la progettazione di un edificio.

Di seguito si riportano 3 diversi studi eseguiti in Europa secondo standard europei, volti a determinare la trasmittanza termica delle balle di paglia.

Nelle conclusioni ne verranno citati anche altri, di cui non è stato possibile trovare la relazione tecnica, e di cui dunque si dispone solo dei risultati.



### 2.5.1 La prova tedesca

Questa prova è stata svolta nel maggio 2003 presso il Forschungsinstitut für Wärmeschutz (letteralmente: Istituto di ricerca sull'isolamento termico) di Monaco, un organismo accreditato dalla Commissione europea per la sorveglianza e certificazione di materiali di isolamento termico e componenti per l'edilizia.

È stata seguita la norma DIN 52612 EN 12667 ISO 8301 (→ *capitolo 1.8*), che standardizza il metodo di determinazione della conducibilità termica; la prova è standardizzata anche in Italia, con il nome di UNI 7891.

La paglia viene prima seccata a 70 °C per eliminare l'umidità, quindi viene pressata all'interno di un telaio di legno di 50x50 cm e 10 cm di spessore, fino a raggiungere una densità di 90 kg/m<sup>3</sup>.

Il provino viene quindi posto tra due termoflussimetri e due piastre mantenute a temperatura costante tramite la circolazione di fluidi termostatati; tra le 2 piastre c'è una differenza di temperatura di circa 15 °C.

In particolare l'uso del flussimetro è standardizzato dalla ISO 8301, mentre l'uso delle piastre dalla ISO 8302.

In presenza di ambienti a diversa temperatura si genera un flusso di calore dalla situazione a temperatura superiore a quella a temperatura inferiore, fino a quando non sia raggiunto l'equilibrio termico; tale flusso di calore viene misurato dal flussimetro, e ci permette di valutare la conducibilità del materiale.

Il valore è quello cerchiato in verde; si riferisce al campione secco, con temperatura media delle 2 piastre di 10 °C:

$$\lambda_{10, \text{tr}} = \mathbf{0,0379 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}}$$



**Wärmeleitfähigkeit nach DIN 52612**

Prüfbericht Nr: F.2-430/03

**Antragsteller:** Fachverb.Strohballenbau Deutsche.V.Dipl.-Ing.Dirk Scharmer, 21335 Lüneburg  
**Materialbezeichnung:** \* Strohballen \*  
**Materialbeschreibung:** Stroh, nach Angabe unbehandelt, zu Ballen mit den Abmessungen ca. 35 cm x 50 cm x 100 cm gepresst und verschürzt.  
 (nach Angabe) Rohdichte nach Angabe: 90-110 kg/m<sup>3</sup>  
**Probenahme:** Durch Antragsteller am 26.02.03 übersandt.  
**Prüfeinrichtung:** Gerät für das Zweiplattenverfahren nach DIN 52612: Heizplatte 300 x 300 mm mit Heizring 500 x 500 mm  
**Vorbereitung und Einbau des Materials:** \*) Mittelwerte (zwei Probekörper)  
 Einbaudicke<sup>\*)</sup>: 0.1000 m Einbaumasse<sup>\*)</sup>: 2.251 kg (nach Trocknung bei 70 °C)  
 Probenfläche: 0.2500 m<sup>2</sup> Rohdichte<sup>\*)</sup>: 90.0 kg/m<sup>3</sup>  
 Bemerkung: Der Strohballen wurde bei 70°C bis zur Massekonstanz getrocknet und in die der Rohdichte von 90 kg/m<sup>3</sup> entsprechende Menge in einen Sperrholzrahmen mit 100 mm gepresst. Anschließend wurde die Messung durchgeführt.

**Messwerte:**

Versuch Nr	Wärmestrom W	Temperatur der warmen kalten Probenoberfläche °C		Mitteltemperatur der Probe °C	Temperaturdifferenz an der Probe K	Wärmeleitfähigkeit W/(m·K)
		°C	°C			
1	1.139	18.7	2.5	10.6	16.2	0.0380
2	1.159	31.3	15.6	23.5	15.7	0.0401
3	1.159	44.3	29.2	36.8	15.1	0.0419
4	----	----	----	----	----	----
5	----	----	----	----	----	----

Messunsicherheit: < 2%

**Angaben über das Material nach der Messung bis 44.3 °C Warmseite:** \*) Mittelwerte (zwei Probekörper)

Ausbaudicke<sup>\*)</sup>: 0.1000 m Ausbaumasse<sup>\*)</sup>: 2.251 kg  
 Rohdichte<sup>\*)</sup>: 90.0 kg/m<sup>3</sup> Masseänderung: 0.0 %  
 Bemerkung: --

**Ergebnisse:**

Wärmeleitfähigkeit bei 10°C Mitteltemperatur im trockenen Zustand $\lambda_{10, tr}$ W/(m·K)	Zuschlagswert nach DIN V 4108-4 Tab. 4 Zeile 4 Z	$\lambda_{10, tr}$ mit Zuschlagswert Z $\lambda_z$ W/(m·K)	Rechenwert nach DIN 4108 $\lambda_R$ W/(m·K)
<b>0.0379</b>	<b>0.20</b>	<b>0.045</b>	*)

**Beurteilung:** \*) Gemessenen Werte der Wärmeleitfähigkeit gelten für den trockenen Zustand der geprüften Probe.  
 \*) Der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit kann nur im Rahmen eines bauaufsichtlichen Zulassungsverfahrens festgelegt werden.

Gräfelfing, den 02.05.2003

Sachgebietsleiter:  
  
 Dipl.-Ing. (FH) W. Albrecht



Prüfer:  
  
 H. Ortner

Prüfergebnisse beziehen sich nur auf Prüfgegenstände.  
 Eine auszugsweise Veröffentlichung oder eine Bezugnahme auf den Prüfbericht in Druckschriften ist nur mit schriftlicher Genehmigung des FIW München zulässig.

Figura 15: Relazione della prova secondo lo standard DIN 52612 EN 12667 ISO 8301

### 2.5.2 La prova austriaca

Questa prova è stata effettuata nel 2000, dall'austriaca GrAT (Gruppe Angepasste Technologie), un'associazione scientifica per la ricerca e lo sviluppo di tecnologie appropriate.

Si fa riferimento all'ÖNORM B 6015-1, una norma standardizzata dall'ente austriaco ASI; il titolo di tale norma è "Determinazione della conduttività termica mediante piastra calda - Parte 1: Procedura di prova e valutazione dei risultati".

Pur non avendo trovato riferimenti a norme internazionali né europee, la descrizione della procedura seguita riportata nella relazione sottostante e la dimensione e la preparazione del provino, fanno ipotizzare che la prova sia analoga a quella vista in precedenza per lo studio tedesco.

Anche il risultato di conducibilità termica ottenuto è pressoché identico al precedente; si riferisce al campione secco, con temperatura media delle 2 piastre di 10 °C:

$$\lambda_{10, \text{tr}} = 0,0380 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

Gruppe angepasste Technologie  
Technische Universität Wien  
zHd. Herrn D.I. Wimmer  
Wiedner Hauptstrasse 8 - 10  
1040 Wien



MAGISTRAT DER STADT WIEN  
MA 39 - VFA  
MAGISTRATSABTEILUNG 39  
VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT DER STADT WIEN  
gegründet 1879  
AKKREDITIERTE PRÜF- UND ÜBERWACHUNGSSTELLE  
A-1110 Wien, Rembrückstraße 15  
Telefon: (national 01), (international +431) 79514-8039 oder DW  
Telefax: (national 01), (international +431) 79514-99-8039 oder DW  
Internet e-mail: post@m39.magwien.gv.at

MA 39 - VFA 2000-0563.02

Wien, 6. November 2000



## Untersuchungsbericht

### über die Messung der Wärmeleitfähigkeit von Strohballen

**Antragsteller:** Gruppe angepasste Technologie  
Technische Universität Wien

**Antragsdatum:** 6. April 2000

**Prüfgut:** Das Prüfgut (2 Holzrahmen, - oben und unten mit Eisengitter abgeschlossen und mit Stroh gefüllt) wurde am 6. April 2000 an die MA 39 - VFA geliefert. (um Messverfälschungen zu vermeiden wurden vor der Messung die Eisengitter entfernt).

Die Rahmen besaßen die Abmessungen  
500 mm x 500 mm x 100 mm

Auf Wunsch des Antragstellers wurden die Rahmen mit Strohfüllung nach einer entsprechenden Vortrocknung geprüft.

**Prüfprogramm:** Messung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattenapparat gemäß ÖNORM B 6015-1 (letztgültige Ausgabe)

**Kurzbeurteilung:** Die Strohballen weisen eine Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda_{10,0} = 0,0380 \text{ W/mK}$  auf.

Der Bericht umfasst 2 Seiten.



Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die Prüfgegenstände. Alle Seiten des Berichtes sind mit dem Amtssiegel der Stadt Wien versehen. Veröffentlichung und Ausleihe bedürfen der schriftlichen Bewilligung der Analyse, Laborberichte, Gutachten und Stellungnahmen werden im nicht akkreditierten Bereich durchgeführt. Es gelten die derzeit gültigen Allgemeinen Geschäftsbedingungen der MA 39 - VFA.

Akkreditiert als Prüf- und Überwachungsstelle (1) gemäß AKKÖ, BGBl. Nr. 458/1992, i. d. F. des Bundesgesetzes BGBl. Nr. 430/1996 per Beschluss des Bundesministeriums für wirtschaftliche Angelegenheiten, GZ 827 947 83/2007 und (2) gemäß ISO/IEC 17025, Lfd. Nr. 20/98 per Akkreditierungsbescheid des Österreichischen Instituts für Bautechnik, Zahl OIB-190-00/08-010. Mit den Akkreditierungen wird bestätigt, dass die MA 39 - VFA den Anforderungen der EN 45001 und EN 45004 entspricht.

Fernschreiber  
114735  
MA 39 - SD 54 - 115999 - 54

Telegrammenschrift  
MAGISTRAT WIEN

Parteienverkehr  
Montag bis Freitag 7.30 - 15.30 Uhr

DVR:  
0000191

Bankverbindung:  
Bank Austria AG, Wien, Konto 696 254 754

Figura 16: Relazione della prova secondo lo standard ÖNORM B 6015-1

### 2.5.3 Le prove danesi

Le 2 prove seguenti sono state effettuate nel 2001 dal Danish Technological Institute, un istituto autonomo e senza scopo di lucro, approvato dal Ministero della Scienza, tecnologia e innovazione come GTS Institute.

L'Istituto ha fatto 2 tipi diversi di prove:

- misura per determinare la conducibilità termica  $\lambda_{10}$  per un provino di 10 cm di spessore, con riferimento alle norme ISO 8302;
- misure su un provino intonacato per determinare la trasmittanza termica U secondo lo standard ISO 8990.

Di seguito si riportano solo la descrizione e i risultati delle misure di conducibilità termica  $\lambda_{10}$ , siccome abbiamo già visto che la U non è una caratteristica del materiale, ma dipenda dai diversi strati e dal loro spessore.

Le prove sono state fatte sia su balle "on flat", cioè con la paglia parallela al flusso di calore, che "on edge", con paglia perpendicolare al flusso. Inoltre, la  $\lambda_{10}$  è stata misurata per 2 diverse densità, 75 e 90 kg/m<sup>3</sup>.

Le misure sono state fatte con temperature di circa 0 °C sul lato freddo e di circa 20 °C su quello caldo.

I risultati sono riportati in tabella:

Densità kg/m <sup>3</sup>	Conducibilità termica $\lambda_{10}$ W/(m·K)	
	"on flat"	"on edge"
75	0,057	0,052
90	0,060	0,056

*Figura 17: Risultati delle prove*

Si nota che ci sono piccole variazioni a seconda della densità e della disposizione della paglia; in particolare la  $\lambda_{10}$  è maggiore nel caso di paglia parallela al flusso di calore e nei provini a maggiore densità.



# Prøvningsrapport

Dato: 2001.02.08      Rapport nr. 00163      Sagsnr.: 270-9-3141      Side: 1 af 1      info@teknologisk.dk  
www.teknologisk.dk

## Rekvirent:

By og Byg  
Att: Birte Møller Andersen  
Postboks 119, 2970 Hørsholm  
Tlf. 45 86 55 33

## Fabrikant:

By og Byg

## Emne:

Halm – varmestrom parallelt med stråretning  
Dimensioner (mm):  
Id.nr. 00163    Rekv.nr.

**Tabel 1: Emner efter tildannelse**

		1	2
Længde	mm	501	500
Bredde	mm	500	499
Tykkelse under måling	mm	138,0	132,8
Densitet af halmballe	kg/m <sup>3</sup>	≈ 76,0	
Densitet under måling	kg/m <sup>3</sup>	75,5	78,1
Fugtindhold under måling	vægt %	1,41	2,42

Tørretemperatur i varmeskab 60°C  
Materiale tørret inden prøvning

## Terminer:

Emne udtaget:  
Emne modtaget: 2000.12.12  
Emne prøvet: 2000.12.30

## Procedure:

Bestemmelse af byggematerialers basisvarmelednings-  
evne,  $\lambda_{10}$  W/mK. Prøvningen er udført i henhold til  
gældende udgaver af EN 822, 823 (1994) og ISO 8302  
(1991).

## Resultat

Se tabel 2.  
Måleusikkerhed ±2%

**Tabel 2: Måleresultater**


Må- ling nr.	Middelovertemperatur af prøver °C		Middel- tempe- ratur differens	Middel- tempe- ratur af prøver	Middel varme- lednings- evne
	Varme sider	Kolde sider	K	°C	W/mK
1	20,00	0,01	19,99	10,01	0,0570
2	29,00	9,15	19,85	19,07	0,0617

## Vilkår

Prøvningen er udført på omstændige vilkår i henhold til de  
for laboratoriet af DANAK fastlagte retningslinier herfor.  
De i rapporten anførte resultater gælder kun for det  
prøvede emne. Prøvningsrapporten må kun gengives i  
uddrag, hvis laboratoriet skriftligt har godkendt uddraget.

## Bemærkninger:

Varen er prøvet "tør".  
Der vil blive foretaget parallelmåling på én halmvare efter  
opbevaring ved 23°C og 50% RF.

  
Otto Paulsen  
Laboratorieansvarlig  
λ-Laboratoriet, TEA  
Energidivisionen, Taastrup

S:\SP\Lamb-00\nr00163-byg.doc

Figura 18: Relazione della prova per densità di 75 kg/m<sup>3</sup> e paglia parallela al flusso di calore



# Prøvningsrapport

Dato: 2001.02.08      Rapport nr. 00180      Sagsnr.: 270-9-3141      Side: 1 af 1      info@teknologisk.dk  
www.teknologisk.dk

**Rekvirent:**  
By og Byg  
Att: Birte Møller Andersen  
Postboks 119, 2970 Hørsholm  
Tlf. 45 86 55 33

**Fabrikant:**  
By og Byg

**Emne:**  
Halm - varmestrom parallelt med stråretning  
Dimensioner (mm):  
Id.nr. 00180    Rekv.nr.

**Tabel 1: Emner efter tildannelse**

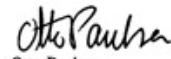
	1	2
Længde	mm 501	500
Bredde	mm 500	499
Tykkelse under måling	mm 153,5	144,9
Densitet af halmkugle	kg/m <sup>3</sup> ≈ 76,0	
Densitet under måling	kg/m <sup>3</sup> 84,3	99,4
Fugtindhold under måling	vægt % 0,22	0,15

Tørretemperatur i varmeskab 60°C  
Materiale tørret inden prøvning

**Terminer:**  
Emne udtaget:  
Emne modtaget: 2000.12.12  
Emne prøvet: 2001.01.09

**Procedure:**  
Bestemmelse af byggematerialers basisvarmelednings-  
evne,  $\lambda_{10}$  W/mK. Prøvningen er udført i henhold til  
gældende udgaver af EN 822, 823 (1994) og ISO 8302  
(1991).

**Resultat**  
Se tabel 2.  
Måleusikkerhed ±2%

  
Otto Paulsen  
Laboratorieansvarlig  
λ-Laboratoriet, TELA  
Energidivisionen, Taastrup

**Tabel 2: Måleresultater**

Må- ling nr.	Middelloverflade temperatur af prøver °C		Middel- tempe- ratur af differens	Middel- tempe- ratur af prøver	Middel varme- lednings- evne
	Varme sider	Kolde sider	K	°C	W/mK
1	20,00	-0,03	20,03	9,98	0,0603

**Vilkår**

Prøvningen er udført på omstændige vilkår i henhold til de for laboratoriet af DANAK fastlagte retningslinier herfor. De i rapporten anførte resultater gælder kun for det prøvede emne. Prøvningsrapporten må kun gives i uddrag, hvis laboratoriet skriftligt har godkendt uddraget.

**Bemærkninger:**

Varen er prøvet "tør".  
Der vil blive foretaget parallelmåling på én halmvare efter opbevaring ved 23°C og 50% RF.

S:\SP\1.amb-00\mr00180-byg.doc

Figura 19: Relazione della prova per densità di 90 kg/m<sup>3</sup> e paglia parallela al flusso di calore



## Prøvningsrapport

Dato: 2003.01.28 Rapport nr. 01041/rev. Sagsnr.: 270-9-3141 Side: 1 af 1

### Rekvirent:

By og Byg  
Att: Birte Møller Andersen  
Postboks 119, 2970 Hørsholm  
Tlf. 45 86 55 33

### Fabrikant:

By og Byg

### Emne:

Halm – varmemstrøm vinkelret på stråretning  
Dimensioner (mm):  
Id.nr. 01041


**Tabel 1: Emner efter tildannelse**

		1	2
Længde	mm	500	500
Bredde	mm	500	499
Tykkelse under måling	mm	129,9	128,0
Densitet af balle	kg/m <sup>3</sup>	76,0	
Densitet under måling	kg/m <sup>3</sup>	75,6	77,0
Fugtindhold under måling	vægt %	0,44	0,51

Tørretemperatur i varmeskab 60°C  
Ingen tørring inden prøvning

### Terminer:

Emne udtaget: 2000.12.12  
Emne modtaget: 2000.12.12  
Emne prøvet: 2001.05.17

  
Otto Paulsen  
Laboratorieansvarlig  
λ-Laboratoriet, TECLA  
Energidivisionen, Taastrup

### Procedure:

Bestemmelse af byggematerialers basisvarmelednings-  
evne,  $\lambda_{10}$  W/mK. Prøvningen er udført i henhold til  
gældende udgaver af EN 822, 823 (1994) og ISO 8302  
(1991).

### Resultat

Se tabel 2.  
Målesikkerhed  $\pm 2\%$

**Tabel 2: Måleresultater**

Må- ling nr.	Middeloverflade temperatur af prøver °C		Middel- tempe- ratur differens	Middel- tempe- ratur af prøver	Middel varme- lednings- evne
	Varme sider	Kolde sider	K	°C	W/mK
1	20,00	0,06	19,94	10,03	0,05153

### Vilkår

Prøvningen er udført på omstændige vilkår i henhold til de for  
laboratoriet af DANAK fastlagte retningslinier herfor. De i  
rapporten anførte resultater gælder kun for det prøvede  
emne. Prøvningsrapporten må kun gengives i uddrag, hvis  
laboratoriet skriftligt har godkendt uddraget.

### Bemærkninger:

S:\SP\Lambda-rapp-01\nr01041-byg.doc

Figura 20: Relazione della prova per densità di 75 kg/m<sup>3</sup> e paglia perpendicolare al flusso di calore





# Prøvningsrapport

Dato: 2003.01.28

Rapport nr. 01030/rev.

Sagsnr.: 270-9-3141

Side: 1 af 1

info@teknologisk.dk  
www.teknologisk.dk

## Rekvirent:

By og Byg  
Att: Birte Møller Andersen  
Postboks 119, 2970 Hørsholm  
Tlf. 45 86 55 33

## Fabrikant:

By og Byg

## Emne:

Halm – varmemstrøm vinkelret på stråretning  
Dimensioner (mm):  
Id.nr. 01030

**Tabel 1: Emner efter tildannelse**

	1	2
Længde mm	500	500
Bredde mm	500	499
Tykkelse under måling mm	125,9	125,0
Densitet af balle kg/m <sup>3</sup>	76,0	
Densitet under måling kg/m <sup>3</sup>	89,5	89,3
Fugthold under måling vægt %	5,95	5,53

Tørretemperatur i varmeskab 60°C  
Ingen tørring inden prøvning

## Terminer:

Emne udtaget: 2000.12.12  
Emne modtaget: 2000.12.12  
Emne prøvet: 2001.05.03

## Procedure:

Bestemmelse af byggematerialers basisvarmeledningsevne,  $\lambda_{10}$  W/mK. Prøvningen er udført i henhold til gældende udgaver af EN 822, 823 (1994) og ISO 8302 (1991).

## Resultat

Basisvarmeledningsevne  $\lambda = 0,05572$  W/mK ved  
middeltemperatur 10°C  
Temperaturindflydelse  $\Delta\lambda/\Delta T = 2,86E-04$  W/mK<sup>2</sup>.  
Måleusikkerhed  $\pm 2\%$



Otto Paulsen  
Laboratorieansvarlig  
 $\lambda$ -Laboratoriet, TELA  
Energidivisionen, Taastrup

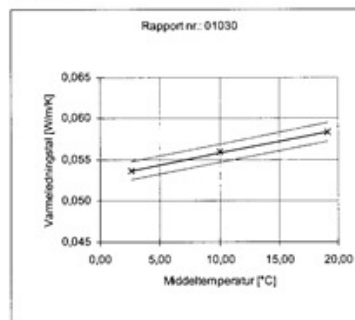
**Tabel 2: Måleresultater**

Måling nr.	Middeloverflade temperatur af prøver °C		Middeltemperatur differens	Middeltemperatur af prøver	Middelvarmeledningsevne
	Varmer side	Kolde side	K	°C	W/mK
1	12,00	-6,78	18,78	2,61	0,05354
2	20,00	0,00	20,00	10,00	0,05590
3	29,00	9,19	19,81	19,09	0,0582

## Vilkår

Prøvningen er udført på omstændige vilkår i henhold til de for laboratoriet af DANAK fastlagte retningslinier herfor. De i rapporten anførte resultater gælder kun for det prøvede emne. Prøvningsrapporten må kun gives i uddrag, hvis laboratoriet skriftligt har godkendt uddraget.

**Figur 1**



## Bemærkninger:

S:\SP\Lambdambda-rapp-01\ur01030-byg.doc

Figura 21: Relazione della prova per densità di 90 kg/m<sup>3</sup> e paglia perpendicolare al flusso di calore

### 2.5.4 Conclusioni

In tabella sono riportati i valori di conducibilità delle prove viste in precedenza, e di altri di cui non è stato possibile trovare la relazione ma solo i risultati.

Prova	Anno	Densità kg/m <sup>3</sup>	Conduttività termica $\lambda_{10}$ W/(m·K)
Pruteanu	2010	51	0,061
Christian et al.	1998	62	0,082
"Danese"	2001	75	0,057
Pruteanu	2010	76	0,053
"Tedesca"	2003	90	0,038
Sandia National Lab.	1994	90	0,060
"Austriaca"	2000	90	0,038
"Danese"	2001	90	0,060
McCabe	1993	150	0,060

Figura 22: Valori di  $\lambda_{10}$  secondo le diverse fonti esaminate

Dalla tabella si nota che i valori sono abbastanza dispersi, e che la densità non sembra influenzare particolarmente il risultato.

Il valore di  $\lambda$  che si trova normalmente nella letteratura tecnica e laddove si parla delle proprietà di isolamento termico della paglia è di 0,04 W/(m·K); tale valore non è compatibile con quanto detto fin'ora, anche senza considerare il risultato dei test di Christian et al. che è molto diverso dagli altri.

Volendo fare un'ipotesi cautelativa, a vantaggio della sicurezza, come normalmente dovrebbe fare un tecnico, sarebbe meglio considerare un valore di  $\lambda$  leggermente maggiore:  $\lambda_{\text{paglia}} = 0,04 \div 0,06$  W/(m·K). La media dei valori riportati in tabella (senza considerare il risultato dei test di Christian et al.), è infatti pari a 0,053 W/(m·K).

Per dare un senso a questo valore basta pensare che la conducibilità termica per il classico mattone forato comunemente utilizzato in edilizia vale 0,36 W/(m·K), un ordine di grandezza superiore.

Si vedrà nel seguito ( $\rightarrow$  capitolo 4.3), a fronte di un tale valore di  $\lambda$ , quanto varrà la U per una parete di paglia intonacata su entrambi i lati.

## 2.6 Isolamento acustico

Il rumore proveniente dall'esterno, da abitazioni attigue ma anche dall'interno della stessa abitazione, può diventare in particolari condizioni fonte di disagio e fastidio per gli occupanti. Già in fase di progetto devono quindi essere presi precisi provvedimenti finalizzati a:

- evitare che il suono esterno entri nell'edificio o comunque a fare in modo che ne sia smorzata l'intensità;
- evitare che all'interno dell'edificio il suono si propaghi con facilità da un ambiente all'altro.

Per garantire un buon fonoisolamento all'interno degli edifici, ossia minimizzare la trasmissione del rumore, è necessario, oltre che predisporre una corretta dislocazione delle stanze, scegliere per pareti, solai, tetto, dei materiali e delle soluzioni costruttive che assicurino una sufficiente protezione dai rumori, possibilmente migliore rispetto ai limiti di legge.

I limiti di legge a cui è obbligo attenersi in materia di requisiti acustici passivi degli edifici sono quelli fissati dal D.P.C.M. 5/12/97.

Gli edifici sono ripartiti in 7 categorie, cui competono determinati limiti di rumorosità e requisiti acustici, riportati in tabella:

- A. residenze;
- B. uffici;
- C. alberghi;
- D. ospedali;
- E. scuole;
- F. ricreativi e di culto;
- G. commerciali.

Categoria	$R_w^*$	$D_{2m,nT,w}^*$	$L_{n,w}^*$	$L_{ASmax}^{**}$	$L_{Aeq}^{**}$
D	55	45	58	35	25
A, C	50	40	63	35	35
E	50	48	58	35	25
B, F, G	50	42	55	35	35

\* valori espressi in dB

\*\* valori espressi in dB(A)

Figura 23: Requisiti acustici passivi fissati dal D.P.C.M. 5/12/97

Tali requisiti sono:

- $R'_w$ : indice del potere fonoisolante apparente relativo alla parete di separazione tra due ambienti;
- $D_{2m,nT,w}$ : indice dell'isolamento acustico standardizzato di facciata;
- $L_{n,w}$ : indice del livello sonoro di calpestio dei solai;
- $L_{ASmax}$ : livello massimo di rumore per gli impianti a funzionamento discontinuo (es. scarichi);
- $L_{Aeq}$ : livello massimo di rumore per gli impianti a funzionamento continuo (es. caldaie, condizionatori).

Da luglio 2010 è stata pubblicata in Italia la norma UNI 11367 “Classificazione acustica delle unità immobiliari”. Con tale norma è stata introdotta anche in Italia, come già da tempo in altri paesi europei, la procedura di valutazione e verifica in opera di alcuni requisiti acustici con la possibilità di esprimere tramite un unico descrittore l'insieme dei requisiti. L'elemento caratterizzante della norma è che i valori dei requisiti acustici vanno ottenuti tramite collaudi in opera. Nella tabella seguente sono riportati i valori limite per ogni classe con riferimento ai singoli requisiti.

Classe	$D_{2m,nT,w}^*$	$R'_w^*$	$L'_{n,w}^*$	$L_c^{**}$	$L_d^{**}$
I	$\geq 43$	$\geq 56$	$\leq 53$	$\leq 25$	$\leq 30$
II	$\geq 40$	$\geq 53$	$\leq 58$	$\leq 28$	$\leq 33$
III	$\geq 37$	$\geq 50$	$\leq 63$	$\leq 32$	$\leq 37$
IV	$\geq 32$	$\geq 45$	$\leq 68$	$\leq 37$	$\leq 42$

\* valori espressi in dB

\*\* valori espressi in dB(A)

Figura 24: Requisiti acustici passivi fissati dalla norma UNI 11367

I limiti vigenti in Italia in materia di prestazioni acustiche degli edifici sono ancora quelli definiti dal D.P.C.M. 5/12/97; infatti la norma UNI 11367 è una norma e non è una legge: pertanto, finché tale norma non sarà ripresa e specificata dalla legislazione italiana, la procedura di classificazione acustica è facoltativa. La classificazione acustica delle unità immobiliari secondo la UNI 11367 è stata introdotta per dare all'acquirente o al locatario un'indicazione,

tramite un singolo descrittore ottenuto a seguito di collaudi in opera, delle caratteristiche acustiche di un immobile.

L'indice di potere fonoisolante  $R_w$ , in dB, definisce la capacità fonoisolante nei confronti dei rumori aerei di un elemento divisorio. Con il termine  $R_w$  ci si riferisce al potere fonoisolante di un elemento piano senza incastri; è quindi una misura teorica, da laboratorio: per questo quando si progetta un edificio di fa riferimento al valore  $R'_w$ , ossia al valore per strutture in opera.

$R'_w$ , ossia l'indice del potere fonoisolante apparente di elementi di separazione fra ambienti, tiene conto delle trasmissioni laterali attraverso il contatto con elementi attigui ed è un valore più vicino alla situazione reale e per questo peggiore rispetto ad  $R_w$  (anche fino a 7 db).

Più  $R'_w$  è alto, migliore è l'isolamento acustico e quindi maggiore è l'abbattimento dell'intensità del rumore.

Il rispetto dei limiti deve essere verificato mediante misurazioni in opera ad edificio finito: in questo modo si tiene conto sia della componente diretta di trasmissione del suono sia della trasmissione per fiancheggiamento, ossia del rumore trasmesso indirettamente attraverso le strutture collegate. Infatti va sempre ricordato che ciò che vale è il comportamento dell'intero sistema costruttivo e non le caratteristiche dei singoli materiali.

### 2.6.1 Esempio di valutazione di $R'_w$ per una casa di paglia

Come abbiamo visto nel capitolo precedente non esistono in letteratura valori di  $R'_w$  per i materiali, dovendolo verificare mediante misurazioni in opera ad edificio finito.

Per farsi un'idea delle caratteristiche della paglia si riporta quindi di seguito la descrizione di una prova svolta nel 2001 dal laboratorio danese DELTA, un GTS Institute.

Le misure sono state effettuate in una casa ad un solo piano, con pareti in balle di paglia; le balle hanno dimensione di 800x450x380 mm, e una massa di 12÷14 kg.

Le pareti sono intonacate con uno strato di circa 40 mm di argilla.

Sono state effettuate 2 sessioni di misura:

- la prima tra la camera 1 e la camera 2; fra di esse le balle sono posizionate sul lato corto, per uno spessore totale di 460 mm;
- la seconda tra il garage e la camera 1; qui le balle sono sul lato lungo, e lo spessore totale vale quindi 530 mm.

Le misure sono effettuate in base allo standard DS/EN ISO 140-4:1998: si impiega una cassa acustica in un locale e si misurano con fonometri i livelli sonori del rumore in entrambi i locali. La differenza delle due misurazioni rappresenta il fonoisolamento del muro.

I risultati sono valutati in base alla DS/EN ISO 717-1:1997: Il potere fonoisolante "globale" di un divisorio ( $R_w$ ) si ricava posizionando un'opportuna curva di riferimento in modo che la somma degli scarti tra questa e la curva sperimentale soddisfi un requisito minimo. Il valore numerico di  $R_w$  è il valore assunto dalla curva di riferimento in corrispondenza di 500 Hz.

Nei certificati delle prove di laboratorio si riportano, oltre a  $R'_w$ , anche i valori, in bande di terzi d'ottava, del potere fonoisolante  $R$  (relativo al suono di una certa frequenza) e dei cosiddetti termini di adattamento "C".

I risultati delle misurazioni sono significativamente influenzati dalla trasmissione del suono attraverso le parti in legno presenti nella struttura e dalla presenza di impianti tecnici nel muro.

Misure tra la camera 1 e la camera 2, separate da una parete in balle di paglia intonacate con argilla, per uno spessore totale di 460 mm.

$$R'_w (C; C_{tr}) = 46 (0; -2) \text{ db}$$

Frekvens f [Hz]	R' 1/3-oktav [dB]
100	33,8
125	38,8
160	41,2
200	42,2
250	43,8
315	38,6
400	42,4
500	40,5
630	42,9
800	43,9
1000	45,8
1250	46,8
1600	49,6
2000	52,2
2500	53,7
3150	56,4

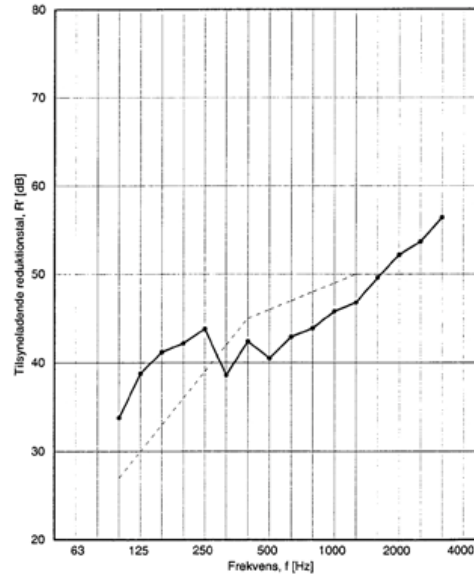


Figura 25: Risultati delle misure fra la camera 1 e la camera 2

Misure tra la camera 1 e il garage, separate da una parete in balle di paglia intonacate con argilla, per uno spessore totale di 530 mm.

$$R'_w (C; C_{tr}) = 52 (-2; -6) \text{ db}$$

Frekvens f [Hz]	R' 1/3-oktav [dB]
100	34,1
125	34,0
160	35,9
200	37,1
250	38,8
315	45,0
400	48,4
500	49,1
630	50,9
800	52,1
1000	54,4
1250	57,5
1600	57,9
2000	60,8
2500	62,7
3150	62,5

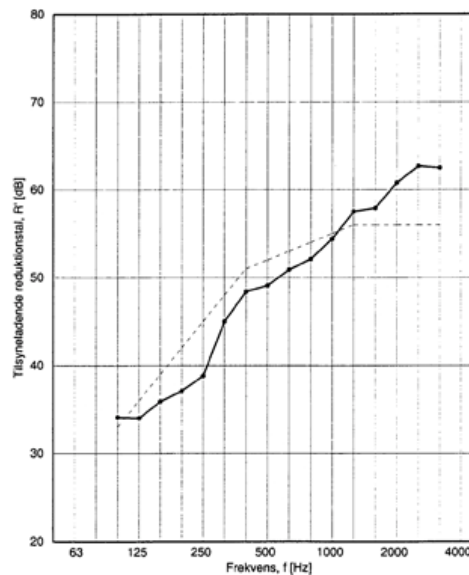


Figura 26: Risultati delle misure fra la camera 1 e il garage

## **2.7 L'autocostruzione**

*Quando la casa diventa una necessità dell'anima,  
oltre che del corpo, inventa una casa possibile...  
se non riesci a comprarti una casa, autocostruiscila!*

Fare autocostruzione significa essere compartecipi di un processo di produzione dell'habitat condiviso e partecipativo, nel quale i futuri proprietari sono direttamente coinvolti nella realizzazione materiale delle proprie abitazioni, all'interno di un gruppo organizzato, gestito e diretto da professionisti ed esperti.

*“Al fine di lottare contro l'esclusione sociale e la povertà, l'Unione riconosce e rispetta il diritto all'assistenza sociale e all'assistenza abitativa volte a garantire un'esistenza dignitosa a tutti coloro che non dispongano di risorse sufficienti, secondo le modalità stabilite dal diritto comunitario e le legislazioni e prassi nazionali”.*

Pur non avendo dirette competenze in materia, già con la Carta dei diritti fondamentali dell'Unione europea proclamata a Nizza nel 2000, l'Europa dichiarava che il diritto alla casa sociale è compreso tra quelli fondamentali. Più recentemente, nella “Comunicazione della Commissione sui servizi sociali di interesse generale nella UE (2006)” fra i servizi sociali viene indicato l’“Housing Sociale, che fornisce abitazione per cittadini svantaggiati o gruppi socialmente meno avvantaggiati”.

“Farsi la casa” o “adattare un luogo ad alloggio” fa parte della storia sociale dell'abitare, di cui sono portatori tanti nuclei familiari che nel nostro paese sceglievano, per contenere i costi di costruzione, di realizzare la casa con le proprie mani, mettendo a disposizione il tempo libero e le loro capacità manuali. Anche in tempi recenti, nei quali la tecnologia edilizia ha assunto un carattere specialistico e industriale, la pratica di costruire direttamente, in tutto o in parte, la casa in cui si andrà ad abitare, è rimasta diffusa soprattutto fra i ceti popolari.



La moderna autocostruzione, tuttavia, abbandona la dimensione propria del lavoro artigianale autogestito, per divenire una pratica edilizia industrializzata che fa ricorso a precise modalità e tecnologie costruttive, diretta e coordinata da professionisti ed esperti. È per questi motivi che il prodotto architettonico dell'autocostruzione non può essere collocato in un sottomercato rispetto a quello regolare dell'abitazione, ma presuppone un significativo apporto di conoscenze, professionalità, metodologie, modalità e certificazioni nel corso dell'intero processo edificatorio, tali per cui il prodotto finale non solo è in grado di soddisfare tutti i requisiti legislativi ed amministrativi richiesti ad un tradizionale iter edificativo, ma anche di fornire all'utente finale un alloggio salubre ed eco-sostenibile, competitivo con quelli della produzione corrente sul piano della qualità architettonica, della durabilità, del risparmio energetico, della biocompatibilità.

### 2.7.1 Gli obiettivi dell'autocostruzione

Sono molteplici gli obiettivi che ci si pone quando si sceglie di autocostruire:

- rendere possibile l'accesso ad una abitazione in proprietà a nuclei familiari, che non potrebbero acquisirla a prezzi accettabili sul mercato immobiliare, consentendo un sensibile abbattimento del costo di costruzione. L'abbattimento è in stretta relazione con la percentuale di opere realizzate in autocostruzione, e può oscillare tra il 40 e il 60%. La finalità dell'autocostruzione è dunque, principalmente, quella di soddisfare a costi accettabili il bisogno abitativo di nuclei familiari a basso reddito (comunque in grado di rimborsare un mutuo bancario, sebbene contratto a condizioni favorevoli).

Un complesso di fattori ha concorso negli ultimi anni a quella che viene definita "la nuova questione abitativa": fattori demografici (le dimensioni dei nuclei familiari si sono ridotte, si vive più a lungo, l'immigrazione è cresciuta, le famiglie si rompono più facilmente); fattori sociali (aumenta il numero di famiglie indebolite dalla crisi, ricompare la povertà abitativa, la disoccupazione crescente accentua le disuguaglianze e la polarizzazione sociale); fattori legati ai mercati immobiliari (insufficienza di offerta sociale, riduzione delle risorse pubbliche, erosione e peggioramento dei costi dei mercati dell'affitto, crescita della rendita immobiliare);

- promuovere la convivenza tra le diverse componenti sociali e garantirne la coesione. Agire in maniera associata con altre persone, permette di condividere le responsabilità, le problematiche, le difficoltà che accompagnano necessariamente un impegno come quello dell'autocostruzione;
- diventare un utile strumento sia per la formazione di mano d'opera che per l'incremento delle opportunità di impiego degli stessi auto costruttori;
- può essere la soluzione ideale in situazioni di emergenza, come la ricostruzione dopo la guerra o un terremoto.

### 2.7.2 La gratuità della manodopera e la compartecipazione

Il principale elemento che caratterizza la moderna autocostruzione è la partecipazione associata dei futuri proprietari all'atto fisico del costruire.

L'impegno degli autocostruttori a prestare la propria opera manuale in cantiere per un numero prestabilito di ore consente naturalmente un forte contenimento dei costi di costruzione; le ore di attività, contabilizzate e monetizzate secondo precisi criteri, rappresentano comunque anche un valore economico che andrà ad aggiungersi a quello effettivo delle abitazioni. Il lavoro degli autocostruttori rappresenta dunque una sorta di capitale immobilizzato da ciascuno di loro.

In ogni progetto di autocostruzione edilizia è fondamentale la formazione dei soggetti che andranno a lavorare in cantiere per la costruzione delle proprie case. Le competenze acquisite da ogni singolo soggetto autocostruttore, costituiscono un know-how associato, importante per l'economia generale del progetto, per far sì che ogni operazione eseguita sia adeguata ed efficiente in termini costruttivi, ma anche e soprattutto perché il "costruire insieme" consente il raggiungimento dell'obiettivo finale in maniera sinergica e virtuosa. A questo fine, è fondamentale che ogni autocostruttore sia pienamente responsabile e consapevole rispetto al suo coinvolgimento in un processo nel quale il singolo apporto non solo è fondamentale, ma è anche complementare e fondamentale visto nell'ottica del lavoro di squadra. Condividendo l'impegno fisico e le competenze di ognuno per raggiungere l'obiettivo comune, si crea evidentemente un legame che trasforma i rapporti di vicinanza in una comunità coesa.

### 2.7.3 Le modalità dell'autocostruzione

Il percorso dell'autocostruzione si snoda attraverso una serie di step che possono essere compresi in due fasi distinte (ma indissolubili):

- **fase propedeutica ai lavori di cantiere;** si svolge attraverso:
  - la presa di contatto con amministrazioni pubbliche disponibili a promuovere e sostenere l'iniziativa;
  - l'individuazione, in collaborazione con queste, di aree sulle quali edificare, di preferenza terreni di edilizia popolare (che abbiano in ogni caso un costo sostenibile o che siano cedute gratuitamente, in proprietà o in diritto di superficie);
  - la promozione della conoscenza dell'iniziativa presso l'opinione pubblica dei territori nei quali si realizzano i progetti;
  - l'informazione, la sensibilizzazione e il coinvolgimento nell'iniziativa di soggetti interessati;
  - la selezione degli autocostruttori e la loro associazione in cooperativa;
  - l'assegnazione alla cooperativa delle aree individuate;
  - l'elaborazione dell'idea di progetto urbanistico ed edilizio e la definizione dei costi di costruzione;
  - la scelta degli istituti di credito disponibili ad erogare il mutuo necessario in maniera agevolata;
  - l'adempimento di tutte le pratiche amministrative necessarie sia per la concessione del mutuo, che per il ritiro del permesso di costruire;
- **fase dei lavori di cantiere;** si svolge attraverso:
  - la formazione degli autocostruttori alle modalità e alle tecniche proprie del processo edilizio in autocostruzione;
  - il coordinamento e la direzione dei lavori in autocostruzione ;
  - lo stimolo di rapporti di vicinato virtuosi tra il nucleo di autocostruttori nuovi residenti di quartiere e la comunità locale dove si realizza l'intervento.

#### 2.7.4 La necessità di un'Alta regia

Fondamentale, per creare le condizioni affinché il progetto di autocostruzione si concretizzi e per stimolare ed accompagnare gli autocostruttori prima e durante il processo di costruzione, è il lavoro di un team di esperti in mediazione, in progettazione architettonica e direzione dei lavori di cantiere che, esulando da qualsiasi logica di ricerca di profitto, contribuisca a sostenere le attività del gruppo di autocostruttori e a risolvere eventuali problemi e conflittualità che dovessero insorgere. Peraltro, particolare impegno deve essere prestato nella selezione dei potenziali autocostruttori. La selezione è infatti una operazione assolutamente rilevante ai fini del successo di un'iniziativa che è rivolta a gruppi familiari e singoli, per i quali non si tratta di soddisfare solo un bisogno abitativo, ma anche di intraprendere un percorso comune di convivenza che non è, di per sé, affatto scontato.

In conclusione la struttura che deve soddisfare questo complesso di esigenze, deve necessariamente possedere conoscenze e competenze che la mettano in condizione sia di rispondere alle esigenze "sociali" espresse dal gruppo di autocostruttori, prima e durante il processo edificativo, sia avere le professionalità necessarie ad implementare tale processo.

## **2.8 Conclusioni**

La casa realizzata con balle di paglia, pur utilizzando un materiale povero, consente di raggiungere alte performance di efficienza energetica, di comfort ambientale e, contemporaneamente, di mettere in atto soluzioni sostenibili.

Per quanto visto finora, è possibile trarre una serie di conclusioni:

- la paglia è un sottoprodotto della produzione dei cereali: costruire con paglia consente quindi di utilizzare un prodotto di scarto, evitando l'estrazione di nuove materie prime e consumo di energia;
- durante la sua crescita, il grano sequestra CO<sub>2</sub> dall'atmosfera;
- le murature in balle di paglia intonacate in terra cruda e calce sono altamente traspiranti e consentono il passaggio del vapore dall'interno verso l'esterno; si evitano così la formazione di umidità e condensa all'interno dell'edificio;
- le murature in balle di paglia hanno un'ottima resistenza al fuoco (R30-90);
- le murature in balle di paglia provvedono ad un ottimo isolamento termico, di uno fino a 2 ordini di grandezza inferiore a quello dei materiali convenzionali per l'edilizia; ciò implica un minor fabbisogno energetico e quindi spese contenute e minori emissioni;
- le murature in balle di paglia hanno un alto potere fonoassorbente.

Una casa in balle di paglia è semplice da costruire, e si presta molto bene all'autocostruzione. Costruire la propria casa con l'aiuto di amici e parenti può essere un'esperienza entusiasmante e di grande crescita personale per tutti coloro che sono coinvolti.

Per quanto riguarda i costi, l'uso in sé delle balle di paglia al posto, ad esempio, del mattone, comporta sì un notevole risparmio (circa 10 volte), ma influisce poco sul totale di un edificio. Il vero risparmio deriva da sue fattori:

- l'autocostruzione, se possibile, permette di abbattere notevolmente i costi (si circa la metà);
- l'uso: una casa a basso consumo può ridurre le spese di oltre la metà rispetto alla media europea.

**Parte terza**

# **Life Cycle Assessment**





### **3.1 Che cos'è un LCA**

La Life Cycle Assessment (LCA) è una procedura che consente l'identificazione dei carichi ambientali associati ad un prodotto, processo o attività, seguendo l'oggetto dello studio lungo tutto il suo ciclo di vita.

Tale percorso, che si esplica sia a monte sia a valle della fase di utilizzo, inizia con l'estrazione delle materie prime, attraversa la fase di lavorazione, distribuzione, uso e riuso del prodotto e termina con lo smaltimento finale, individuando e quantificando i consumi di materia ed energia e le emissioni nell'ambiente.

La definizione viene stabilita nel 1990:

*“un procedimento oggettivo di valutazione di carichi energetici ed ambientali relativi ad un processo o attività, effettuato attraverso l'identificazione dell'energia e dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell'ambiente. La valutazione include l'intero ciclo di vita del processo o attività, comprendendo l'estrazione e il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l'uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale.”*

Nella definizione vengono sottolineati alcuni aspetti:

- l'oggettività del procedimento, vale a dire l'esecuzione di fasi analitiche precise e ben determinate;
- lo studio di dati confrontabili e scientificamente verificabili;
- la considerazione dell'intero ciclo di vita, che presuppone una visione globale del sistema in esame.

L'obiettivo da perseguire, nella prospettiva di un possibile miglioramento, è rappresentato dalla valutazione degli impatti ambientali imputabili allo stato in essere del processo o dell'attività studiata.

La quantificazione dei carichi ambientali del ciclo di vita di un prodotto o servizio avviene attraverso la contabilizzazione di tutti i consumi di materie prime, acqua e fonti energetiche, detti “input” e di tutte le emissioni gassose, liquide e solide, di rifiuti e di altri rilasci, detti “output”.

In particolare l'LCA valuta anche i “risparmi ambientali” dovuti alla produzione evitata di materiali ed energia grazie al riuso, al riciclo o alla

termovalorizzazione del prodotto considerato.

Infatti, è proprio grazie all'identificazione di criticità ambientali, in gergo "bottleneck" cioè "colli di bottiglia", che si può mirare all'ottimizzazione dei processi e dell'uso delle risorse.

### 3.1.1 Normativa di riferimento

La normativa di riferimento nel campo della LCA sono le internazionali ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006 (elaborate in seno all'ISO/TC 207 "Environmental management" SC 5 "Life cycle assessment"), e pubblicate dall'UNI come norme UNI EN ISO in lingua inglese.

Le due norme hanno l'obiettivo di facilitare il processo di valutazione degli effetti che un prodotto può avere sull'ambiente nell'intero suo ciclo di vita, incoraggiando in tal modo un più efficiente utilizzo delle risorse. In particolare:

- UNI EN ISO 14040:2006 "Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento": fornisce in un quadro generale le pratiche, le applicazioni e le limitazioni dell'LCA, ed è destinata ad una vasta gamma di potenziali utenti e parti interessate, anche con una conoscenza limitata della valutazione del ciclo di vita. La presente norma è la versione ufficiale della norma europea EN ISO 14040 (edizione luglio 2006). La norma descrive i principi ed il quadro di riferimento per la valutazione del ciclo di vita (LCA);
- UNI EN ISO 14044:2006 "Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Requisiti e linee guida": è stata elaborata per la preparazione, la gestione e la revisione critica del ciclo di vita. Fornisce le linee guida per la fase di valutazione dell'impatto dell'LCA, la fase di interpretazione dei risultati, la valutazione relativa alla natura e alla qualità dei dati raccolti.

Tali nuove edizioni delle norme, aggiornate per migliorarne la leggibilità ma inalterate nei requisiti e nei contenuti tecnici (eccetto per gli errori e le discordanze), sostituiscono le precedenti edizioni delle norme (UNI EN ISO 14040:1998, UNI EN ISO 14041:1999, UNI EN ISO 14042:2001 ed UNI EN ISO 14043:2001).

### 3.2 Metodologia LCA

Nella nostra società si sta diffondendo sempre più una cosiddetta “*coscienza ambientale*”, dovuta all’esistenza di una crescente domanda di prodotti eco-compatibili da parte dei consumatori, e quindi di una nuova attraente possibilità di sviluppo per le imprese e dall’entrata in vigore di normative europee che hanno aperto un nuovo scenario sia nel campo industriale che in quello edile.

L’analisi del ciclo di vita è una valutazione che trae origine a seguito di questo scenario. In particolare, negli ultimi decenni, è cresciuta la sensibilità verso lo sviluppo di metodi e tecniche che permettano di capire, valutare e conseguentemente ridurre i possibili impatti, sia dei prodotti realizzati, sia di quelli che, una volta utilizzati, cessano di avere qualsiasi utilità per il detentore e che devono, perciò, essere smaltiti.

Lo studio LCA si basa sull’analisi del ciclo di vita di un prodotto, questo significa partire dall’estrazione delle materie prime necessarie per la sua creazione per arrivare fino ad un momento in cui tutti i materiali che compongono il prodotto ritornano alla terra. La metodologia LCA considera tutte le fasi di vita di un prodotto tutte intercorrelate, parte quindi dal presupposto che da un’operazione discenda la successiva.



Figura 27: Fonte: Danish Environmental Agency 1

Tale metodologia consente di determinare e quantificare i carichi energetici ed ambientali, concreti e potenziali, presenti nella varie fasi del ciclo di produzione e consumo della bioenergia, considerate correlate e interdipendenti.

Attraverso l’LCA, quindi, si quantificano gli effetti ambientali dei flussi in entrata e in uscita dal sistema produttivo ricorrendo ad opportuni indicatori d’impatto.

Il ciclo di vita si compone in delle sottocategorie e comprende:

- pre-produzione: produzione materie prime, trasporto, stoccaggio;
- produzione: trasformazione materiale, assemblaggio, finitura;
- distribuzione: logistica e vendita del prodotto;
- uso e consumo: utilizzazione e impiego;
- smaltimento: gestione fine vita.

L’insieme di queste macrofasi viene comunemente detto percorso “from cradle to grave”, vale a dire “dalla culla alla tomba”.

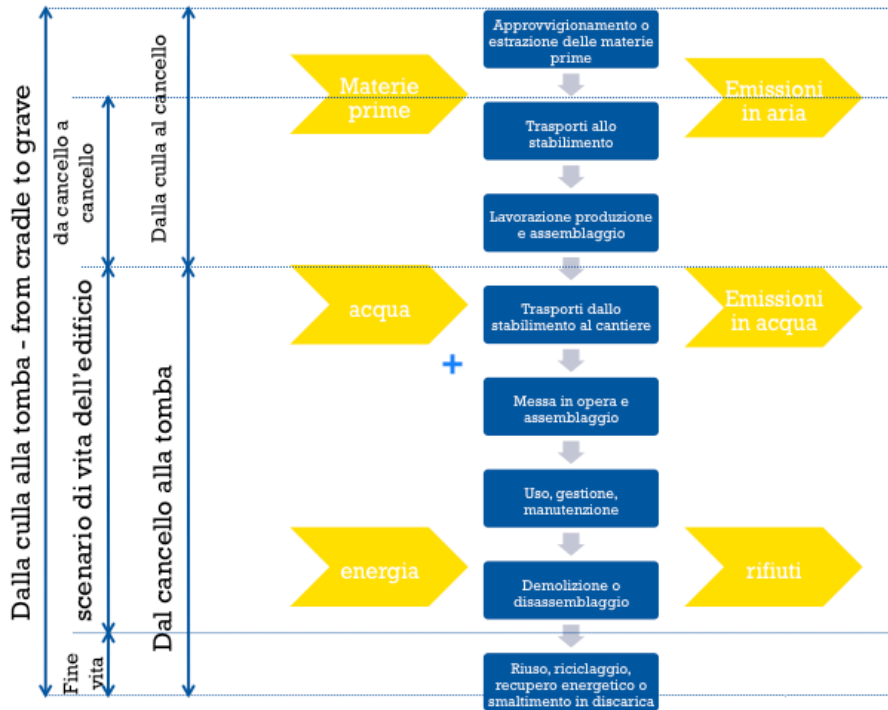


Figura 28: Diagramma a blocchi di una LCA

### 3.2.1 Differenti tipologie di LCA

L'approccio "from cradle to grave" fornisce la descrizione più accurata dei carichi ambientali del sistema in studio in una LCA.

La scelta di seguire l'oggetto dello studio dalla culla alla tomba è dettata principalmente da due ragioni:

- in primo luogo, una singola operazione industriale può apparentemente essere resa più efficiente e "più pulita" trasferendo l'inquinamento in altri comparti ambientali, così che i benefici derivanti da queste azioni sono controbilanciati da problemi generati altrove, senza conseguire nel complesso alcun reale miglioramento;
- in secondo luogo tale approccio permette di passare da una tipologia di studio tipica dell'ingegneria tradizionale, focalizzata sull'efficienza dei singoli sistemi produttivi, ad una visione globale dell'intera catena produttiva.

Anche se considerata la migliore metodologia, questa può essere molto onerosa sia in termini di tempo sia a livello economico.

In risposta a queste considerazioni, sono stati individuati metodi per semplificare la metodologia di LCA, per renderla più veloce e meno dispendiosa, senza rinunciare alle caratteristiche fondamentali di uno studio completo e senza perdere l'accuratezza e l'attendibilità dei risultati. Infatti a seconda dello scopo e degli obiettivi dello studio, una LCA può essere condotta più o meno dettagliatamente.

Le strategie semplificative possono riguardare la limitazione degli obiettivi, la riduzione della quantità di dati richiesti o il restringimento dei confini del sistema.

In quest'ultimo caso le semplificazioni introdotte producono degli studi di LCA definiti come segue:

- "*from cradle to gate*" (dalla culla al cancello): lo studio inizia con l'approvvigionamento delle materie prime e delle fonti di energia e si conclude con l'immissione del prodotto finito sul mercato, escludendo quindi la fase di utilizzo e di smaltimento dello stesso;

- “*from gate to gate*” (dal cancello al cancello): lo studio analizza unicamente la realtà aziendale, quindi comprende le fasi di fabbricazione e assemblaggio del prodotto.
- “*from cradle to cradle*” che comprende anche la rivalorizzazione del prodotto a fine vita attraverso il recupero di energia e materiali, nell’ottica di diminuire progressivamente la quantità di rifiuti da inviare allo smaltimento in discarica. Conferire valore intrinseco a un qualsiasi prodotto a fine vita vuol dire promuovere ogni attività di recupero, reimpiego e riciclaggio, considerando lo smaltimento finale in discarica una fase residuale da attuare in condizioni di massima sicurezza che arrechi il minor danno possibile all’ambiente.

### **3.3 La struttura LCA**

La definizione specifica riportata nella normativa ISO 14040 esprime la LCA come una “*compilazione e valutazione attraverso tutto il ciclo di vita dei flussi in entrata e in uscita, nonché i potenziali impatti ambientali, di un sistema di prodotto*”.

Per prima cosa, è necessario definire l’obiettivo e l’ambito dell’indagine; successivamente, bisogna costruire la cosiddetta “analisi dell’inventario”: in questa fase vengono annotati (secondo regole ben precise) i flussi di materiale ed energia dei diversi passaggi del procedimento in esame, in relazione ad una grandezza che tiene conto dei benefici (unità di beneficio).

In un terzo passaggio, dopo aver completato tutti i bilanci, è possibile iniziare la valutazione dell’impatto ambientale: tale stima serve per identificare e quantificare i potenziali effetti ambientali dei sistemi analizzati e fornisce informazioni essenziali per le interpretazioni successive, che vengono realizzate nel quarto passaggio.

A questo punto, i risultati dei bilanci di massa ed energia e la valutazione del rischio vengono riassunti, discussi e valutati in relazione all’obiettivo precedentemente fissato. Per ottenere delle risposte alla domanda posta inizialmente, possono comunque essere presi in considerazione altri contributi (raccomandazioni circa il modo di procedere o altre decisioni), che vanno oltre il puro risultato ottenuto.

Lo stesso vale per elementi soggettivi come i principi morali, la realizzabilità tecnica, nonché gli aspetti socio-politici ed economici.

Come definito dalla norma la metodologia LCA si compone di quattro fasi principali:

1. definizione degli obiettivi e dei confini del sistema (*Goal and scope definition*);
2. redazione e analisi dell’inventario (*LCI - Life Cycle Inventory*); compilazione di un inventario completo dei flussi in ingresso (materiali, energia, risorse naturali) e in uscita (emissioni in aria, acqua e suolo, rifiuti) che siano rilevanti per il sistema definito;

3. valutazione degli impatti ambientali (*LCIA - Life cycle impact assessment*): valutazione dei potenziali impatti ambientali diretti e indiretti, associati a questi input e output e della loro significatività;
4. interpretazione dei risultati e analisi di miglioramento (*Interpretation and improvement analysis*): analisi dei risultati delle due fasi precedenti e definizione delle possibili linee di intervento.

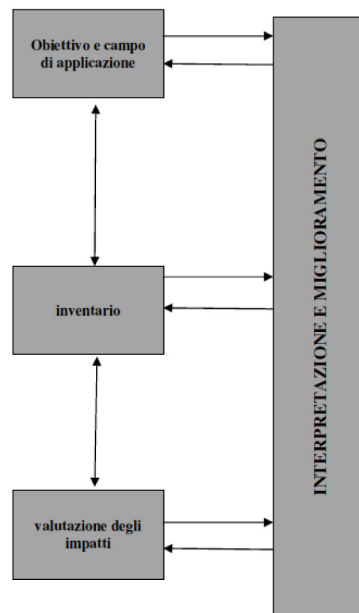


Figura 29: Schema a blocchi delle 4 fasi di una LCA

Trattandosi di modelli operativi, tutte le LCA possono essere considerate in qualche modo “semplificate”, in quanto ipotesi e assunzioni di lavoro tendono per loro natura a semplificare o trascurare parti di sistema reale, coerentemente con quanto stabilito degli obiettivi del lavoro e con le risorse a disposizione.

Comunque, data la gran mole di dati in gioco, per soddisfare le esigenze dell’analisi, per l’elaborazione dei dati è indispensabile usare strumenti di tipo informatico.

I modelli informatici di analisi e le banche dati costituiscono, quindi, parte integrante della strumentazione necessaria per affrontare una LCA.



### 3.3.1 Definizione degli obiettivi e dei confini del sistema

La definizione di ambito ed obiettivo di uno studio LCA è un passaggio cruciale, in quanto è la fase in cui vengono prese le decisioni più importanti. In accordo con le intenzioni e gli interessi specifici, viene definito il contesto dell'indagine e vengono fissate le richieste per le fasi successive.

Questo aspetto potrebbe riguardare il livello di approfondimento dello studio, la qualità dei dati richiesta, la selezione dei parametri per la realizzazione della stima dell'impatto ambientale e le possibili interpretazioni all'interno del contesto della valutazione; il risultato nasce dai processi iterativi di LCA.

**Definizione dell'obiettivo;** i fini concreti e gli interessi specifici di uno studio LCA devono essere fissati durante la fase di definizione dell'obiettivo; allo stesso modo, anche i gruppi a cui è indirizzata l'indagine devono essere indicati chiaramente. Se necessario, bisognerebbe sottolineare quale sia il ruolo di LCA all'atto di prendere una decisione ed, eventualmente, se questa indagine sia collegata o meno ad altre (ad esempio: di taglio economico, tecnologico o sociale). All'atto di rendere noti i risultati, inoltre, è molto importante sottolineare quali siano le domande per le quali LCA è adatto e quali non lo siano.

**Definizione dei confini del sistema;** i confini del sistema devono essere definiti in accordo con quelli che sono gli obiettivi di LCA.

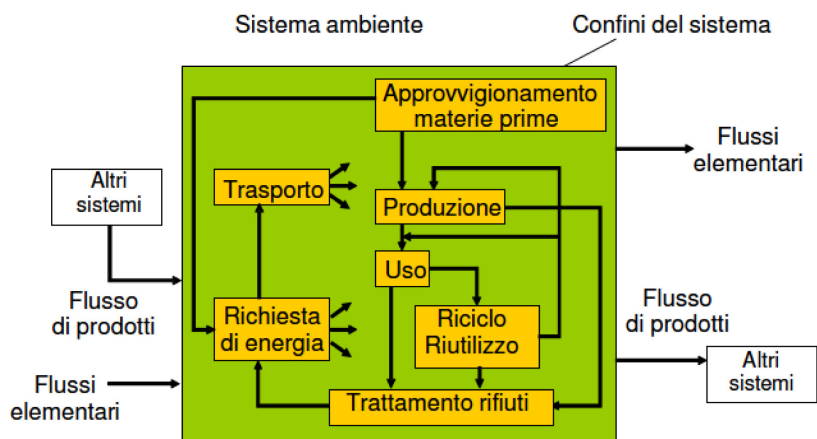


Figura 30: Definizione dei confini del sistema

Innanzitutto, è necessario vagliare attentamente i mezzi utilizzabili, il contesto temporale e la disponibilità (o meno) di tutti i dati necessari; entrando più nel dettaglio, bisogna determinare tutti gli aspetti temporali, spaziali, pratici e tecnici (cioè la scala del bilancio) relativi allo studio. I confini del sistema costituiscono l'interfaccia con l'ambiente e con gli altri sistemi di prodotti; essi definiscono anche quali procedure vadano incluse e quali escluse dall'indagine. Per quanto riguarda l'acquisizione dei dati, è necessario determinarne la scala, il tipo (specifico, medio) e la qualità.

Quando si stabilisce l'estensione del bilancio, è necessario per prima cosa definire i criteri limite e le procedure di allocazione dei prodotti accoppiati (cioè coinvolti in più fasi dell'analisi) per ciascuno dei singoli processi considerati nel bilancio.

- Criteri limite: allo scopo di ridurre l'estensione e la complessità dell'indagine entro limiti ragionevoli, la portata del bilancio deve essere discussa e fissata sulla base di dati aderenti al problema. Con l'aiuto delle analisi di sensibilità e dei criteri di prestazione, inoltre, è possibile determinare se un flusso di materiale possa (o meno) essere limitato. Tra gli altri, possono essere considerati i seguenti criteri:
  - criterio di massa; solo nel caso in cui il bilancio di massa del flusso di un materiale cada al di sotto di una certa soglia minima (stabilita a priori) sia in entrata, che in uscita rispetto al sistema, allora è possibile trascurare gli aspetti relativi alla produzione di tale materiale;
  - criterio energetico; in maniera analoga, gli aspetti relativi ad un certo materiale possono essere trascurati solo qualora il suo contributo all'energia totale (ottenuta sommando le quote di tutti i materiali) cada al di sotto di una certa soglia (stabilita a priori).
- Procedura di allocazione; se si dovessero presentare produzioni accoppiate nel sistema esaminato, sarebbe necessario applicare una ripartizione; le produzioni accoppiate sono processi che, insieme al prodotto desiderato, generano anche sostanze secondarie che possono essere impiegate in altre procedure. Gli effetti ambientali causati da

procedimenti di questo genere devono essere ripartiti (in maniera proporzionale) a tutti i prodotti accoppiati presenti nel sistema in esame, secondo regole ben precise.

Bisogna, inoltre, determinare le funzioni dei sistemi esaminati, nonché le loro **unità funzionali**; i benefici (o le funzioni) dei sistemi di prodotti analizzati devono essere determinati chiaramente. Per quantificare un certo beneficio, è necessario definire un'unità funzionale (ad esempio: una tonnellata di prodotto), che serva da riferimento per tutti i flussi in entrata e in uscita rispetto al sistema e per i potenziali effetti ambientali.

Comparando tra loro differenti prodotti o procedure, risulta di particolare importanza che il criterio dell'equivalenza funzionale (le proprietà e le funzioni dei prodotti devono essere simili; ad esempio: contenitori di bevande da 1 L) sia valido per i sistemi analizzati: solo in queste condizioni, infatti, è possibile tracciare un paragone.

Le differenze negli effetti ambientali riscontrabili a livello di sistemi alternativi possono essere attribuite ai prodotti o alle procedure in esame solo qualora le funzioni dei sistemi analizzati siano equivalenti.

### 3.3.2 Redazione e analisi dell'inventario

La redazione dell'inventario (*LCI - Life Cycle Inventory*) è il cuore di un'analisi LCA; i flussi di materiale ed energia vengono annotati minuziosamente, prendendo in considerazione l'intera vita del prodotto in esame. Questi flussi sono espressi in unità fisiche (unità di massa e di energia) e comprendono l'utilizzo di risorse e di energia e tutti i rilasci in aria, in acqua e nel suolo associati al sistema.

Nell'inventario devono essere inclusi i dati raccolti per ognuna delle unità di processo comprese nei confini del sistema.

La qualità dei dati raccolti ed usati nella fase di inventario è propedeutica alla qualità finale dello studio LCA. La raccolta di informazioni deve rispondere a criteri di completezza, precisione, rappresentatività, coerenza e riproducibilità. Un metodo di valutazione semplice consiste nell'effettuare un bilancio di

massa per ogni processo, tenendo conto del fatto che l'ammontare degli input deve essere pari al rilascio degli output.

E' necessario descrivere dettagliatamente la qualità dei dati per poter successivamente operare confronti fra studi su sistemi analoghi. Tale descrizione deve definire alcuni parametri quali:

- fattori relativi ad area geografica, tecnologia e periodo temporale di riferimento;
- precisione, completezza e rappresentatività dei dati;
- incertezza dell'informazione.

Durante la raccolta è opportuno usare un consistente numero di fonti come altre analisi LCA, banche dati internazionali o disponibili in software, dati provenienti dalla letteratura, proceedings di convegni e congressi, informazioni disponibili in internet e dati raccolti sul campo presso aziende e industrie. In particolare i dati possono essere suddivisi in tre categorie:

- dati primari, provenienti da rilevamenti diretti;
- dati secondari, ricavati dalla letteratura;
- dati terziari, provenienti da stime e valori medi.

Allo stato attuale, il problema della qualità dei dati rappresenta ancora il punto critico della metodologia del ciclo di vita, poiché esistono sia troppi dati di natura confidenziale, sia differenze consistenti se si paragonano banche dati su uguali processi produttivi.

Nella fase di inventario si raccolgono i dati di processo anche per l'energia utilizzata nel sistema produttivo (energia elettrica, idrocarburi) e nel sistema di trasporto (idrocarburi).

Per agevolare l'indagine LCA, è opportuno suddividere il processo in una serie di sotto-sistemi in cui vengano correttamente assegnati gli input e output, in modo che riflettano le relazioni fisiche insite tra i flussi e i differenti prodotti.

Una volta individuati i flussi in ingresso ed in uscita dal sistema si passa all'aggregazione di questi, tenendo presente che le categorie di dati dovrebbero essere aggregate solo se si riferiscono a sostanze equivalenti e ad impatti ambientali simili.

### 3.3.3 Analisi degli impatti

L'obiettivo della fase di analisi degli impatti è la valutazione (secondo precisi parametri ambientali) dei flussi di materiale e di energia calcolati durante l'analisi dell'inventario: tale stima, quindi, serve per riconoscere, riassumere e quantificare i possibili effetti ambientali dei sistemi esaminati, nonché per fornire informazioni essenziali intese alla loro valutazione.

In via di principio le ISO adottano la metodologia denominata “a fase multipla”, che consiste nell'associare quantitativamente tutti i consumi delle risorse e i rilasci ambientali a determinate categorie d'impatto (eutrofizzazione delle acque, formazione di smog fotochimico, impoverimento dell'ozono stratosferico, ecc.), che saranno successivamente stimate assegnando loro un peso fino a giungere alla determinazione dell'indicatore ambientale finale, somma degli indicatori delle singole categorie d'impatto.

Tale approccio si articola in quattro momenti principali:

- classificazione;
- caratterizzazione;
- normalizzazione;
- ponderazione.

Nel contesto della **classificazione**, i flussi di materiale ed energia, esaminati nell'analisi dell'inventario, vengono assegnati a delle categorie ambientali (assimilabili a veri e propri effetti ambientali). Le categorie di impatto descrivono i potenziali effetti sull'uomo e sull'ambiente; tra le altre cose, esse differiscono in relazione alla loro collocazione spaziale (effetti globali, regionali e locali).

Nella fase di **caratterizzazione**, vengono quantificate le porzioni precedentemente assegnate: con l'aiuto dei fattori di equivalenza, infatti, i differenti contributi dei materiali vengono aggregati in un determinato effetto ambientale e rapportati ad una sostanza (presa come riferimento).

I flussi registrati nell'analisi dell'inventario vengono moltiplicati per i rispettivi fattori di equivalenza e sommati tra loro: il potenziale d'impatto così

determinato rappresenta la misura di un possibile danno ambientale. Ovviamente i valori dei differenti potenziali d'impatto non sono direttamente confrontabili tra loro.

Durante la **normalizzazione**, il potenziale d'impatto determinato viene messo in relazione con un valore di riferimento all'interno della stessa area.

Non viene condotta alcuna aggregazione delle categorie d'impatto in uno (o più) indici riassuntivi; la valutazione dei singoli criteri può quindi essere condotta esclusivamente sulla base di parametri individuali (marginali), che spesso non possono essere tradotti in un linguaggio scientifico.

Normalizzare in definitiva significa dividere la quantità calcolata di una categoria d'impatto per la quantità totale della stessa categoria che si verifica in uno specifico arco temporale e in una determinata zona. Si ottengono così degli indici sintetici, grazie ai quali si può effettivamente comprendere a quale categoria d'impatto il sistema contribuisce maggiormente.

La **ponderazione** o pesatura consiste nell'attribuire un peso di importanza ai diversi effetti causati dal sistema, in modo che possano essere comparati tra loro per effettuare successivamente una ulteriore aggregazione dei dati.

Con la pesatura si determina alla fine un indice assoluto, il cosiddetto eco-indicatore, che esprime in modo complessivo le prestazioni ambientali del sistema.

#### 3.3.4 Interpretazione dei risultati

L'obiettivo della fase di interpretazione è l'analisi dei risultati ottenuti, nonché la spiegazione del significato che essi assumono e delle restrizioni che pongono. I fatti essenziali, basati sui risultati dell'analisi dell'inventario e sulla stima dell'impatto ambientale, devono essere determinati e verificati in merito alla loro completezza, sensibilità e consistenza. Le assunzioni fatte nella fase di definizione dell'obiettivo e dell'ambito dell'analisi devono essere richiamate in questo passaggio: solo sulla base di questi presupposti, infatti, è possibile trarre delle conclusioni e fornire delle raccomandazioni.

### 3.3.5 Software per LCA

Nell'ultimo decennio la rapida divulgazione della metodologia LCA è stata accompagnata dallo sviluppo di numerosi strumenti software tali da agevolare l'utente nella costruzione del modello da studiare offrendo fogli di calcolo e visualizzazioni grafiche che, evidenziando i risultati, ne facilitano l'interpretazione e le conclusioni.

Anche se con caratteristiche e livelli di complessità differenti, qualsiasi software LCA ha la principale funzione di supportare l'utente nelle seguenti tre fasi di analisi:

- inventario: essendo la fase più impegnativa, un software LCA ha il vantaggio di offrire una notevole quantità di dati disponibili pertinenti a svariati settori e con ottimi livelli di qualità. Si cerca così di limitare la soggettività nella scelta delle fonti informative;
- analisi degli impatti: la valutazione degli impatti viene effettuata grazie ai differenti modelli di calcolo presenti in questi strumenti. L'utente può scegliere il metodo di valutazione più appropriato al suo studio realizzando anche comparazioni tra i diversi metodi. Inoltre c'è anche la possibilità di considerare soltanto alcune categorie d'impatto oppure solo alcuni specifici stadi del ciclo di vita;
- interpretazione: la fase conclusiva viene agevolata grazie al supporto di svariate visualizzazioni grafiche; inoltre alcuni software consentono anche analisi di sensibilità, simulazione di scenari alternativi ed elaborazioni statistiche dei risultati.

Essendo il mercato del settore in continua espansione, attualmente sono disponibili approssimativamente 35-40 software tools per analisi LCA, differenti tra loro in prestazioni e campi di applicazione.

### **3.4 LCA in edilizia**

La LCA, nata in ambito industriale, è da molti anni applicata al settore edilizio, sia alla scala di prodotto che a quella di edificio.

Il fondamento della metodologia è l'approccio "life cycle", ovvero quell'approccio che consente di acquisire consapevolezza del danno o delle potenzialità ambientali dovute a ciò che avviene in ognuna delle fasi che compongono il ciclo di vita di un prodotto/edificio: produzione, trasporto, uso, riciclo, riuso o dismissione.

Quest' approccio consente di comprendere come ogni scelta fatta in fase di progettazione e produzione abbia poi delle ricadute nella fase di distribuzione, uso e dismissione.

Obiettivo prioritario dell'applicazione del metodo LCA in edilizia è quello di fornire informazioni ambientali di supporto alle scelte di progetto, tramite una valutazione integrale dei consumi e delle emissioni inquinanti derivanti, a livello di sistema edificio, dalla scelta di certi materiali e componenti edilizi, di certe soluzioni tecnico-costruttive e di certe soluzioni impiantistiche.

Questo strumento quindi può essere utilizzato sia dai progettisti per confrontare il comportamento ambientale di due prodotti alternativi, sia dai produttori che in questo modo individuano i miglioramenti lungo il ciclo di vita di un prodotto.

Il metodo permette di fornire informazioni ambientali di supporto alla progettazione a diversa scala:

- edificio;
- materiali e componenti;
- soluzioni tecnico-costruttive;
- impianti.

In questo modo si può avere una buona monitorabilità nei processi costruttivi sia nella fase cantieristica che in quella di dismissione.

Uno degli aspetti più importanti del metodo LCA negli edifici è quello di considerare il consumo energetico, non solo nella fase di gestione dell'edificio (es. riscaldamento), ma anche il consumo durante la costruzione.



Gli impatti ambientali della produzione di un blocco di laterizio in Spagna, Germania, Francia cambiano notevolmente, non (soltanto) per il tipo di processo produttivo o per l'efficienza dei macchinari utilizzati, ma (soprattutto) per il tipo di vettore energetico utilizzato in questi processi e da questi macchinari. Differenti vettori energetici hanno impatti ambientali diversi.

L'importanza del LCA si evidenzia anche nel computo dell'energia coinvolta; si considerano 2 "tipi" energetici:

- energia diretta: consumata nel processo;
- energia indiretta: estrazione, produzione e trasporto dell'energia sino alla sede in cui viene utilizzata per il processo considerato.

Attraverso una conoscenza approfondita dell'oggetto (quale esso richiede) consente di fare scelte consapevoli sulle modalità di acquisizione delle materie prime, sui processi produttivi, su chi userà il prodotto e sulle modalità di manutenzione e dismissione.

I metodi di valutazione della compatibilità ambientale degli edifici sviluppati con approccio LCA consistono nell'aggregare i risultati di analisi LCA sviluppate su materiali e componenti edilizi includendo anche la valutazione delle energie necessarie al funzionamento degli edifici. Tra i metodi di valutazione a livello internazionale applicabili al settore edilizio ci sono:

- il metodo olandese **Eco-indicator 99**; le categorie di impatto confluiscono in tre categorie di danno ambientale: Human Health, Ecosystem quality, Resources;
- il metodo svedese **EPS 2000** (Environmental Priority Strategies in product development); le categorie di impatto confluiscono in quattro categorie di danno ambientale: Human Health, Ecosystem Production Capacity, Abiotic Stock Resources, Biodiversity;
- il metodo svizzero **IMPACT 2002+**; le categorie di impatto confluiscono in tre categorie di danno ambientale: Human Health, Ecosystem quality, Climate Change, Resources;
- il metodo danese **EDIP** (Environmental Design of Industrial Products), in cui si considerano le sole categorie di impatto.

### 3.4.1 Eco-Indicator 99

L'Eco-indicator 99 è un metodo *damage-oriented*, esprime cioè gli impatti in tre macro-categorie di danno, che racchiudono differenti categorie di impatto.

Le categorie di danno considerate sono quelle connesse:

- alla salute umana (Human Health – HH);
- alla qualità degli ecosistemi (Ecosystem Quality – EQ);
- alle risorse (Resources – R).

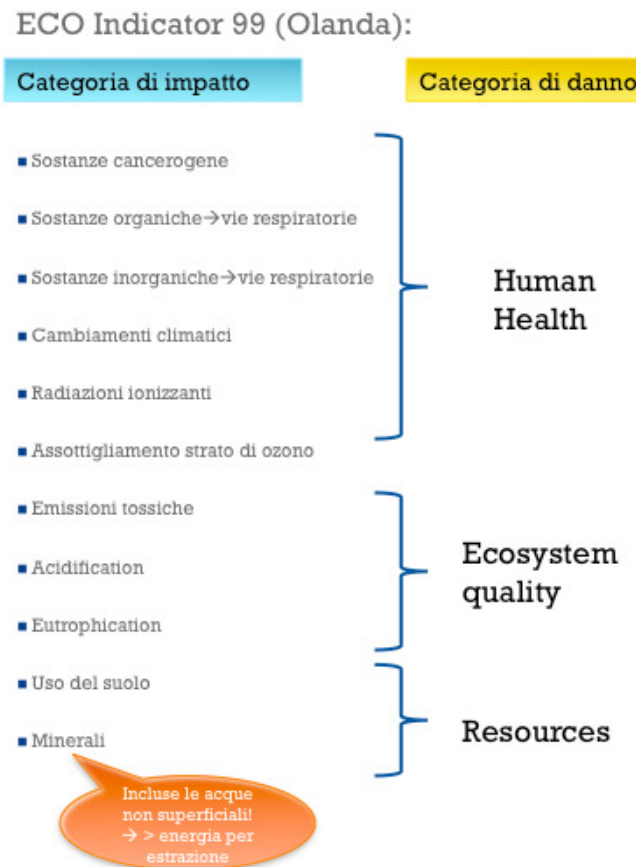


Figura 31: Categorie di danni e di impatti dell'Eco-indicator 99

I **danni sulla salute umana** sono espressi in DALY (Disability Adjusted Life Years). In questa categoria sono modellati i danni causati da tutte le sostanze che abbiano un impatto sulla respirazione (composti organici ed inorganici), sulla carcinogenesi, sui cambiamenti climatici e sullo strato di ozono; sono comprese in questa categoria anche le radiazioni ionizzanti.

I **danni alla qualità degli ecosistemi** sono espressi come la percentuale di specie di piante che si stima siano scomparse da una certa area a causa delle mutate condizioni ambientali ( $PDF \cdot m^2 \cdot yr$ , PDF = Potentially Disappeared Fraction of plant species). In particolare, l'ecotossicità è espressa come la percentuale di specie che vivono in una certa area in condizioni di stress. L'acidificazione e l'eutrofizzazione sono trattate in una singola categoria di impatto e vengono modellate utilizzando delle specie target (piante vascolari). Gli impatti derivanti dall'utilizzo del suolo e dalle sue trasformazioni sono basati su dati empirici relativi alla presenza/assenza di piante vascolari, che è funzione dell'utilizzo del suolo e dell'ampiezza dell'area. Sono modellati sia gli impatti locali che quelli regionali.

I **danni sulle risorse** comprendono l'estrazione e l'utilizzo di risorse minerarie e di combustibili. L'estrazione di risorse è correlata a parametri che indicano la qualità delle risorse minerarie e fossili che rimangono nei giacimenti. L'impatto su questa categoria viene quantificato in termini di maggior energia necessaria per le estrazioni future (MJ surplus energy).

L'Ecoindicator 99 è strutturato per un livello europeo; i danni sono normalizzati, infatti, rispetto al danno causato da un cittadino europeo in un anno.

La valutazione del danno nelle tre categorie è poi aggregata in un unico indice (single score) che permette di dare un "punteggio" agli scenari. Quanto più elevato è il valore del single score, tanto maggiore è il danno causato dal processo in esame.

Il contributo relativo delle tre categorie alla definizione dell'indice è stabilito secondo tre diversi modelli che rappresentano diversi "approcci culturali" rispetto alle problematiche ambientali.

### 3.4.2 EPS 2000

Ciò che distingue EPS 2000 dagli altri metodi è il sistema diverso di misura del fattore di *damage assessment* o di caratterizzazione delle categorie di impatto, basato su un criterio di valutazione di tipo economico e quindi dell'assenza della fase di normalizzazione.

La peculiarità di EPS 2000 è infatti quella di stimare il danno in base alla buona volontà da parte della società a pagare WTP (*willingness to pay*) per evitare un peggioramento delle condizioni considerate o per rimediare al danno creato, attribuendo un valore economico al danno. Il metodo EPS 2000 classifica gli indicatori ambientali in quattro categorie di danno:

- Human Health;
- Ecosystem Production Capacity;
- Abiotic Stock Resource;
- Biodiversity;

In ogni categoria di danno sono comprese una o più categorie d'impatto, ciascuna univocamente determinata da una propria unità di misura.



Figura 32: Categorie di danni e di impatti dell'EPS 2000

### 3.4.3 EDIP

Il metodo EDIP è stato sviluppato in Danimarca nel 1991, con l'obiettivo di sviluppare una metodologia che permettesse di considerare gli aspetti ambientali nello sviluppo dei prodotti industriali.

Il metodo comprende le seguenti generali categorie di danno:

- impatto ambientale;
- consumo delle risorse;
- impatto nell'ambiente di lavoro.

Queste tre categorie hanno tra loro la stessa importanza. Gli impatti interni a queste categorie principali sono ulteriormente divisi a seconda della loro estensione geografica in impatto globale, impatto regionale, impatto locale.

Questa suddivisione è significativa per la parte finale della valutazione, dove i contributi alle varie categorie di impatto sono normalizzati e pesati, perché il carattere e il modo dell'azione ha effetti diversi per estensioni geografiche differenti.

Ciò che distingue EDIP dagli altri metodi di valutazione sono: le diverse categorie di impatto le cui unità di misura non riguardano mai gli effetti ma solo le cause (emissioni equivalenti, m<sup>3</sup> di fluido inquinati e kg di rifiuti prodotti), un sistema diverso di misura del fattore di normalizzazione (inverso del danno subito da una singola persona nel 1990), e di valutazione del danno (rapporto tra il danno subito da una singola persona nel 1990 e quello che si ammette possa essere subito da una persona in un anno futuro).

Nella fase di caratterizzazione, per ogni categoria di impatto c'è una sostanza di riferimento alla quale le altre sostanze vengono rapportate. Il fattore di caratterizzazione, in questo caso, è un semplice fattore di equivalenza, ovvero esprime la forza di una certa sostanza calcolata rispetto a una sostanza di riferimento. Per esempio nel *Global Warming* la sostanza di riferimento è il biossido di carbonio, CO<sub>2</sub>, e i vari fattori esprimono in questo modo gli impatti potenziali delle sostanze come grammi di CO<sub>2</sub> equivalenti per un grammo di sostanza. Scrivere che il metano ha un fattore di impatto pari a 25 g CO<sub>2</sub>, significa scrivere che 1 g di metano contribuisce al surriscaldamento del globo quanto 25 g di anidride carbonica.

Come riferimenti di normalizzazione, il metodo EDIP utilizza il consumo di risorse e gli impatti totali dell'anno 1990. Per gli scambi ambientali che avvengono su scala globale (cioè esaurimento risorse, riscaldamento globale e esaurimento dell'ozono), viene usato l'impatto totale globale quale riferimento di normalizzazione. Per gli altri impatti dovuti ad effetti regionali o locali (tutti gli altri), il metodo considera come riferimento il danno totale riferito alla Danimarca.

I fattori di normalizzazione rappresentano l'inverso dell'impatto potenziale per persona subito a causa delle attività umane relative alla categoria di danno considerata.

La normalizzazione, dunque, permette di valutare quali tra i potenziali impatti sono grandi e quali piccoli, mettendoli in relazione agli impatti cui era soggetta una persona media nel 1990.

**Parte quarta**

## **Il caso di studio**





#### **4.1 Pescomaggiore**

Pescomaggiore è un piccolo borgo di origini medioevali alle porte del Parco Nazionale del Gran Sasso – Monti della Laga, ad una decina di chilometri da L’Aquila; situato a quasi 1000 m s.l.m., conta oggi meno di 50 abitanti.

Il 28 settembre 2007 nasce, dalla spontanea iniziativa di residenti, oriundi emigrati e proprietari di immobili, il Comitato per la Rinascita di Pescomaggiore, che si pone finalità di utilità generale di promozione sociale, culturale, ambientale ed economica dell’abitato e del territorio circostante.

Obiettivo del Comitato è frenare il progressivo abbandono del piccolo borgo, favorendo un’agricoltura tradizionale, mettendo in funzione l’antico forno della comunità, dando vita a percorsi artistici nei vicoli silenziosi, per conservare e diffondere la memoria collettiva del luogo.

Alle 3.32 del 6 aprile 2009 Pescomaggiore, come tutto il comune di L’Aquila, viene colpito da una scossa di terremoto di magnitudo momento 6,3. I danni agli edifici sono notevoli, tanto che tutti gli abitanti sono costretti a lasciare le proprie case e a trasferirsi nelle tende.



*Figura 33: vista del paese distrutto dal terremoto*

Il 28 aprile 2009 viene emanato il Decreto legge n.39, riguardante gli interventi urgenti in favore delle popolazioni colpite dagli eventi sismici nella regione Abruzzo il giorno 6 aprile 2009.

All'interno di questo quadro sono state lanciate due misure d'intervento:

- il bando C.A.S.E. sul territorio comunale di L'Aquila;
- il bando Moduli Abitativi Provvisori nei rimanenti comuni del cratere.

Le due misure varate dal governo provvederebbero alle esigenze abitative di parte degli abitanti degli stabili danneggiati (esiti "E").

Il bando C.A.S.E. prevede il trasferimento degli abitanti con la cui casa ha subito un danno superiore ad un certo valore, in quartieri di nuova costruzione localizzati in 20 aree individuate idonee dalla Protezione Civile. Data la numerosa presenza di frazioni all'interno del territorio del comune, spesso si verifica una notevole distanza tra questi piccoli centri storici e i nuovi quartieri. Alcuni paesi quindi resteranno abbandonati per lunghi anni e preda di operazioni speculative.

È il caso di Pescomaggiore, il cui trasferimento dei già pochi abitanti negli alloggi del progetto del Governo, e i tempi lunghissimi dell'emergenza e della ricostruzione significherebbero l'abbandono del paese.

Il Comitato per la rinascita di Pescomaggiore decide quindi, coerentemente con il proprio obiettivo diventato emergenza, di realizzare un villaggio autocostruito e autofinanziato per consentire a più famiglie possibili di Pescomaggiore di restare a vivere nel loro paese.

La Delibera del Consiglio comunale n. 58 del 25 maggio 2009 detta i criteri per la localizzazione e la realizzazione dei manufatti temporanei.

Trattandosi di sistemazione di emergenza, il Comune di L'Aquila intende soddisfare le esigenze abitative temporanee dei cittadini nonché quelle relative allo svolgimento di attività connesse alla residenza definendo criteri e procedure per localizzazione, realizzazione e successiva rimozione di manufatti temporanei, stante la loro caratteristica di provvisorietà.

**COMUNE DELL'AQUILA**  
**Settore Territorio – Servizio Pianificazione**

**MODULO PER RICHIESTA INSTALLAZIONE MANUFATTI TEMPORANEI**

Al Sig. Sindaco  
del Comune di L'Aquila

Il sottoscritto ..... nato a .....(.....) il  
....., residente a ....., Via ..... N.  
....., (C.F. ....) in qualità di ....., del fabbricato  
colpito dal sisma del 06.04.2009, dichiarato di categoria di danno....., avendo a  
disposizione per proprietà/disponibilità il terreno sito in località..... iden-  
tificato al Comune censuario dell'Aquila sez. ....fg. n. .... part. n. ....

**CHIEDE**

di poter installare sul terreno indicato in premessa, un manufatto per residenza a  
carattere temporaneo, secondo le indicazioni e prescrizioni di cui ai criteri ed indi-  
rizzi approvati con D.C.C. n. .... del .....

Assume formale impegno di produrre il certificato di abitabilità del manufatto del  
progettista/direttore dei lavori, comprendente i relativi certificati di conformità degli  
impianti installati e/o analoga documentazione fornita dal produttore/installatore.

Si impegna, altresì, a provvedere alla rimozione del manufatto alla cessazione  
dell'emergenza o in ottemperanza a formale richiesta dell'Amministrazione comun-  
ale.

L'Aquila, li .....

In fede

.....

**Allegati:**

- Autocertificazione se prima casa
- Elenco dei nominativi e dati anagrafici dei componenti del nucleo familiare
- Schema progettuale del manufatto temporaneo firmato da un tecnico abilitato
- Planimetrie indicative, stralcio PRG e planimetria catastali
- Dichiarazione sull'entità del danno come certificata sulla scheda di agibilità redatta dalla Protezione Civile

Figura 34: Modulo per richiesta installazione manufatti temporanei

## 4.2 Il progetto EVA



Figura 35: Pannello illustrativo del Progetto EVA

Su progetto degli architetti Paolo Robazza e Fabrizio Savini dello studio *BAG Officina Mobile* e con l'assistenza tecnica di Caleb Murray Burdeau, esperto in bioarchitettura, si è deciso di realizzare, su terreni concessi in comodato da alcuni compaesani a poche centinaia di metri dal paese, un villaggio di bilocali e trilocali low-cost ed a minimo impatto ambientale nel rispetto delle vigenti norme anti-sismiche ed edilizie.

La tecnologia costruttiva prevede l'utilizzo di una struttura in legno portante e tamponatura in balle di paglia. La modularità delle strutture agevola la loro riproducibilità.

Due le tipologie abitative prese in considerazione (40 m<sup>2</sup> e 56 m<sup>2</sup>), molto simili fra loro, con struttura in legno che risponde alle normative antisismiche e ad un forte carico di neve.

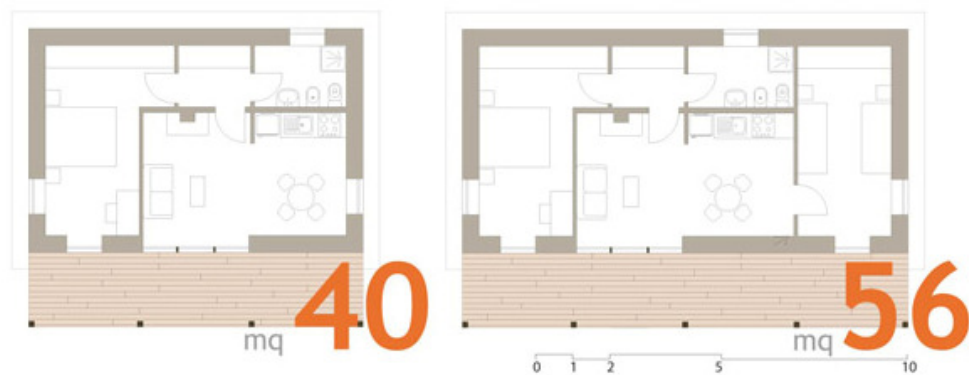


Figura 36: Progetto dei due differenti nuclei abitativi

L'utilizzo della paglia in quest'area dell'Abruzzo è una tecnica costruttiva relativamente nuova, ma che si inserisce in modo naturale nel paesaggio agrario circostante e risponde anche ad un ideale di filiera corta in campo edilizio, in quanto la materia prima sono balle di paglia fornite in loco dai campi di cereali, insieme alla farina che servirà a fare il pane nel forno comune del paese.

L'energia elettrica verrà fornita da impianti fotovoltaici e il riscaldamento da una stufa a legna, sufficiente a scaldare tutta la casa con appena un paio d'ore di accensione, in quanto la paglia ed altri accorgimenti costruttivi, rendono queste case perfettamente coibentate.

Il villaggio sarà poi dotato di un impianto di fitodepurazione e di compostiere dove i rifiuti organici verranno trasformati in fertilizzante per gli orti irrigati anche grazie all'incanalamento dell'acqua piovana.

Il coinvolgimento dei futuri abitanti nella progettazione e nella costruzione è la condizione per assicurare l'alta qualità degli spazi, il risparmio economico ed un forte legame fra gli abitanti stessi e la loro casa-villaggio.

Le prime case sono state inaugurate a febbraio 2010.



*Figura 37: Render delle nuove case con Pescomaggiore sullo sfondo*



*Figura 38: Una delle case da 56 m<sup>2</sup> completata*

#### 4.2.1 La ricerca dell'ALMA

Una volta completato e soddisfatto il fabbisogno locale, il villaggio sarà aperto a cittadini provenienti da altri luoghi del cratere sismico e che sono rimasti senza casa.

Il costo delle abitazioni (circa 650 euro al metro quadro, un quinto di quello degli appartamenti del progetto C.A.S.E.) è sostenuto dalle donazioni per l'Ecovillaggio e per la parte mancante dalle tasche dei beneficiari, in una ragione circa del 50%.

Il completamento dell'EVA sarà il punto di partenza di un percorso alla ricerca dell'ALMA, acronimo di "Abitare-Lavoro-Memoria-Ambiente", un piano di azione da definire ed attuare con gli interessati per l'effettiva Rinascita di Pescomaggiore.

Il piano di azione può compendiarsi in un acronimo A.L.M.A. ovvero Abitare, Lavorare, Memoria, Ambiente, che sono i quattro campi essenziali per lo sviluppo della persona.

ABITARE è in un primo tempo il progetto EVA, ma è soprattutto un piano di recupero partecipato, tempestivo ed efficace del centro storico.

Altrimenti la frammentazione proprietaria e la griglia stretta dei finanziamenti ridurranno a rovina il paese.

LAVORARE è promuovere opportunità di lavoro "verde", anche come reddito complementare, nel territorio di Pescomaggiore. In questo senso la chiara vocazione dell'abitato è all'interno del Parco Nazionale Gran Sasso Monti della Laga, con funzioni turistiche, agrozootecniche e di manutenzione del paesaggio. Attività sperimentali in questi settori svolte nei due anni hanno consentito di valutare positivamente la costituzione di un'azienda agrituristica da presentare a finanziamento pubblico. A condizione di una minima ricettività che, venuta meno a causa del terremoto, può utilmente sostituirsi con un economico intervento di riqualificazione del rifugio di fonte Jonica, una volta restituito dal Comune alla collettività pescolana cui appartiene con ripristino della sorgente.

MEMORIA è la necessaria continuità con la comunità intergenerazionale dei pescolani, antica di almeno dieci secoli. L'idea è di costituire sollecitamente

una memoria comune, all'inizio del XXI° secolo, del millenario quotidiano del paese e della terra, interrogando le voci degli ultimi contadini. A questo potrà aggiungersi il contributo di chiunque voglia partecipare con testimonianze o documenti, anche video. Il tutto avrà un apposito sito su [pescomaggiore.org](http://pescomaggiore.org) liberamente accessibile nella fruizione.

AMBIENTE è il costante termine di riferimento dell'agire. Una qualità essenziale per la rinascita di Pescomaggiore. La manutenzione della pineta di monte Croce, il recupero dei sentieri e dei tholos, la conservazione dell'agrobiodiversità, sono altrettanti specifici interventi che andranno programmati ed implementati nei prossimi anni.



*Figura 39: Zafferano coltivato intorno all'Ecovillaggio*



*Figura 40: I campi di grano solina e farro*



### 4.3 Descrizione della casa di paglia

La casa presa in esame ha una superficie lorda di 70 m<sup>2</sup>, di cui 56 calpestabili. È un'abitazione destinata a un nucleo familiare di 4 persone e prevede un portico d'ingresso che corre per tutto il lato lungo dell'edificio.

La casa è articolata da un nucleo centrale costituito da salotto e cucina, dal quale si accede, da una parte alla camera doppia e dall'altra a un disimpegno che porta al servizio igienico e alla camera matrimoniale.



Figura 41: Pianta della casa in esame

La casa è progettata per raggiungere elevati standard di efficienza energetica e minimizzare gli sprechi, con conseguente risparmio di energia e riduzione dei costi di climatizzazione. Le principali strategie ambientali adottate sono le seguenti:

- **elevato isolamento termico** delle superfici orizzontali e verticali, che ostacola il flusso di calore dall'interno all'esterno. Nel tetto l'isolamento è garantito da uno strato di 25 cm di fibra di cellulosa ( $\lambda=0,6$  W/m·K,  $\mu=2$ ), mentre per le pareti l'isolamento termico è ovviamente garantito dalla paglia. Come già visto infatti, la paglia infatti ha buone caratteristiche di isolamento; un calcolo approssimativo

della trasmittanza di una parete in paglia si può eseguire nel modo visto precedentemente ( $\rightarrow$  capitolo 2.5):

- 0,50 m di paglia,  $\lambda=0,6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;
- 0,02 m di intonaco interno in calce,  $\lambda=0,8 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;
- 0,02 m di intonaco esterno in calce-cemento,  $\lambda=1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ .

$$U = \frac{1}{R_{si} + \frac{S}{\lambda_{cls}} + R_{se}} \rightarrow U = \frac{1}{0,13 + \frac{0,5}{0,06} + \frac{0,02}{1} + \frac{0,02}{0,8} + 0,04} \rightarrow U \approx 0,12 \text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$$

- **impianto a pannelli solari termici** per l'acqua calda sanitaria, collocati sulla copertura; i collettori solari sono in grado di trasformare l'energia solare in energia termica apportando una riduzione dei consumi energetici in fase d'uso;

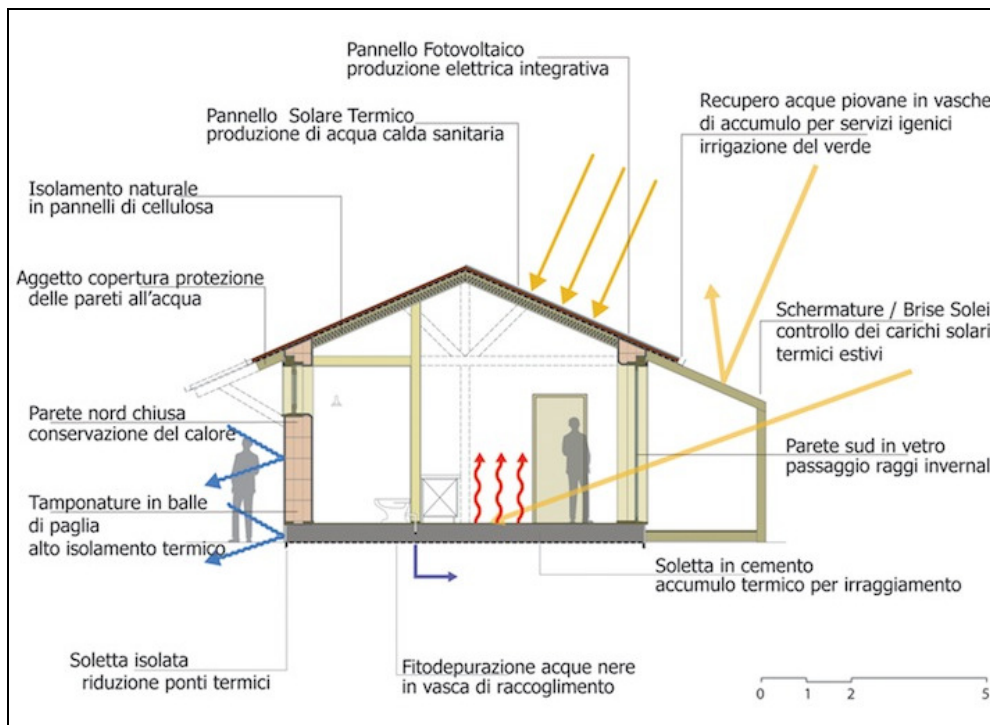


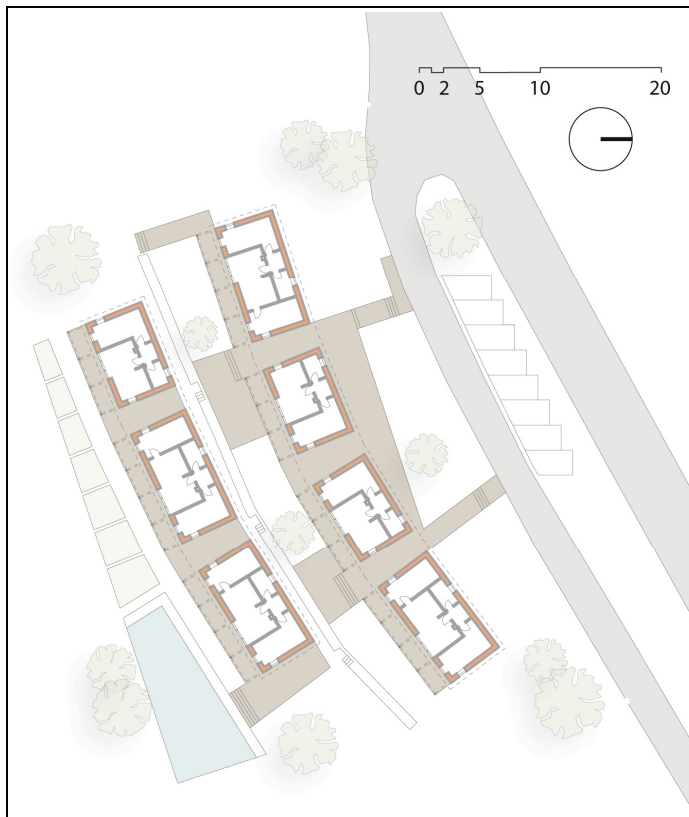
Figura 42: Strategie ambientali

- **il portico**, la cui funzione è quella di preservare la casa dal caldo e dalla forte luce estiva e al contempo di proteggerla dal gelo invernale. La copertura del portico prevede delle schermature brise-soleil per il controllo dei carichi solari termici estivi;
- **compattezza dell'edificio**: costruire in modo compatto è un vantaggio dal punto di vista energetico: minore è la superficie a contatto con le condizioni climatiche esterne, minori sono infatti le dispersioni nel periodo freddo. La compattezza dell'edificio si definisce mediante il rapporto SUPERFICIE/VOLUME, ossia il rapporto fra le superfici disperdenti e il volume riscaldato che questa inglobano. Più questo valore è basso, più l'edificio è compatto e quindi minori sono le dispersioni. La casa studio ha una pianta rettangolare elementare, e quindi è sicuramente molto compatta;
- **impianto di riscaldamento a legna** tramite stube;
- **impianto di fitodepurazione** per le acque nere;



*Figura 43: Realizzazione dell'impianto di fitodepurazione*

- **orientamento:** nel nostro caso di studio la facciata principale, orientata a sud, è caratterizzata da ampie aperture vetrate che permettono un buon irraggiamento solare e riscaldamento naturale anche nei mesi invernali. Al contrario, la parete nord (generalmente la più fredda) è chiusa e non prevede aperture per conservare meglio il calore;



*Figura 44: Disposizione dell'Ecovillaggio*

- **la presenza di ostacoli:** alberature, rilievi, edifici circostanti che possono impedire il soleggiamento nel periodo invernale e quindi l'utilizzo sia passivo che attivo (per il solare termico o per il fotovoltaico) dell'energia solare nel nostro edificio. Il villaggio (che sorge a 714 m s.l.m. nella zona climatica E) come si vede dalla planimetria sopra, è disposto su un terreno in pendenza, privo di particolari ostacoli. Questi piccoli edifici godono tutto l'anno di una favorevole esposizione al sole e sono anche protette dai forti venti.

L'edificio sorge su una platea in calcestruzzo, al quale sono stati ancorati i pilastri e tutta la struttura portante in legno.

Come si vede dal disegno della pianta sottostante, le pareti divisorie sono composte da morali 7,5 x 5 cm disposti a coppie disposte ad un passo di circa 70 cm.

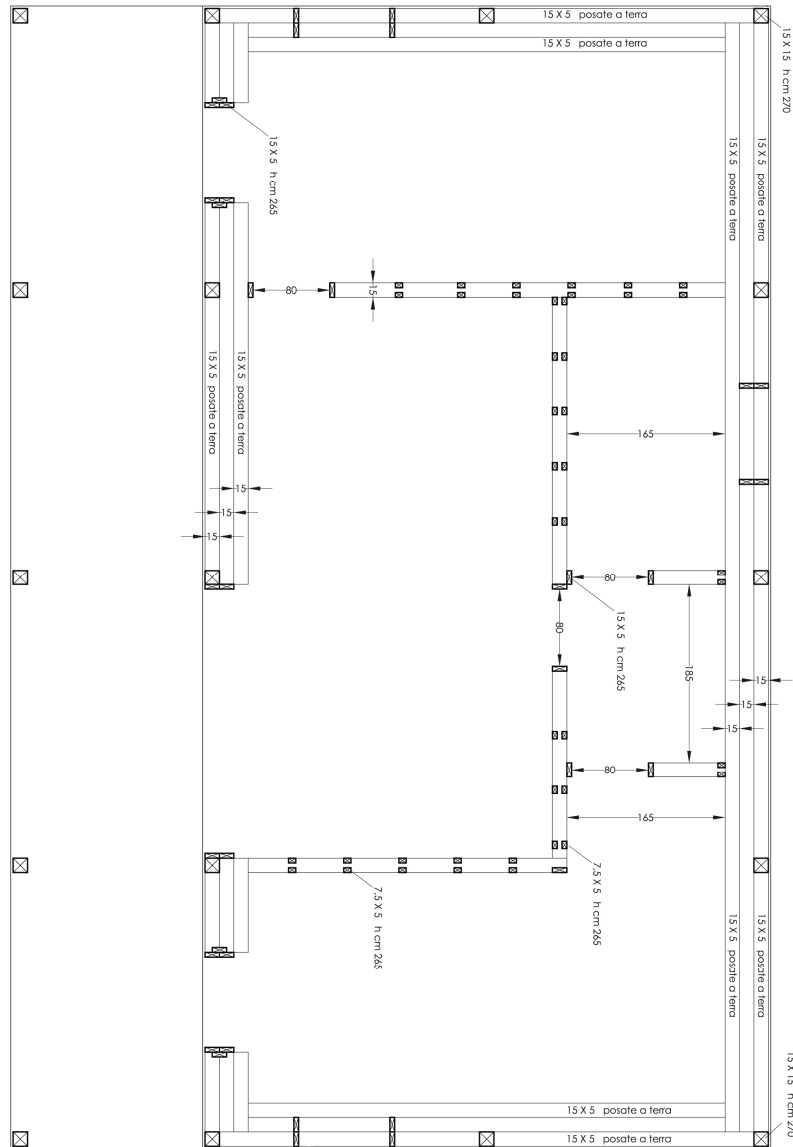


Figura 45: Pianta dell'edificio

Le pareti perimetrali sono rinforzate da una coppia di tiranti di acciaio per ogni campata, che aiutano la struttura nel rispondere all'azione delle forze orizzontali esterne.

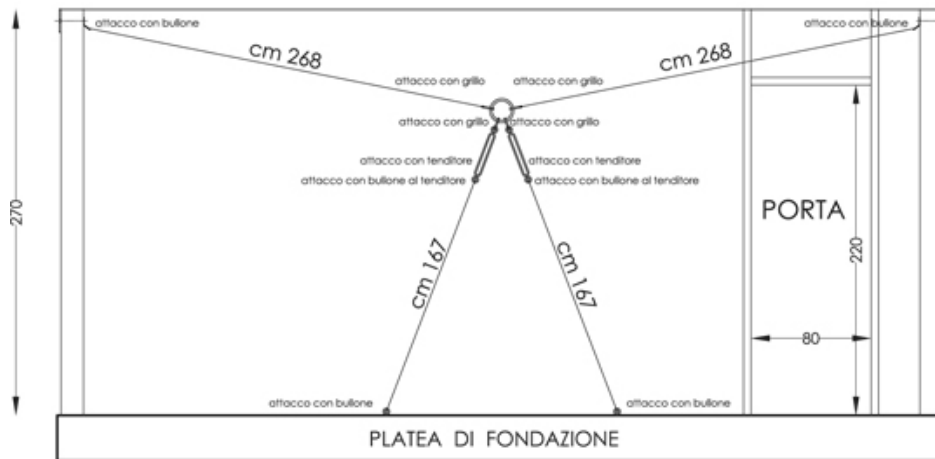


Figura 46: Schema dei tiranti

Anche la copertura, sorretta da tre capriate, è costituita da un primo tavolato di 2,3 cm, la barriera al vapore, i travetti di legno 25 x 5 cm che formano i cassettoni dove si colloca lo strato di 25 cm di isolante di cellulosa. Questo pacchetto si chiude con un successivo tavolato, una guaina impermeabilizzante e i listelli 3 x 5 cm che sorreggono la lamiera zincata.

## **4.4 Analisi LCA della casa di paglia di Pescomaggiore**

### 4.4.1 Definizione obiettivi e campo di applicazione

Oggetto della ricerca è una delle case con tamponatura in balle di paglia a basso consumo energetico costruita a Pescomaggiore (AQ).

### Caratteristiche dell'edificio

- periodo di occupazione: 50 anni
- superficie lorda: 70 m<sup>2</sup>
- superficie calpestabile: 56 m<sup>2</sup>
- forma architettonica: un solo piano a pianta rettangolare
- abitanti: 4 persone

### 4.4.2 Confini di sistema e unità funzionale

L'analisi può definirsi del tipo “dalla culla alla culla”, poiché include anche il fine vita dell'edificio.

Nel modello LCA sono stati infatti considerati i dati relativi alle seguenti fasi:

- estrazione delle materie prime;
- produzione dei materiali costituenti l'involucro edilizio;
- fase di cantiere, comprensiva di trasporto dei materiali e costruzione;
- fase d'uso;
- fine vita, comprensiva di demolizione selettiva e controllata dell'edificio, riuso, riciclo o conferimento in discarica dei materiali.

Come unità funzionale si è deciso di utilizzare l'intera casa di paglia.

#### 4.4.3 Descrizione della casa di paglia

L'edificio in esame è stato scomposto in 2 macro sistemi, suddivisi a loro volta in unità costitutive:

- **involucro edilizio:** include tutte le componenti edilizie messe in opera per la realizzazione dell'involucro. Come si fa tipicamente in edilizia, si è prevista una vita utile dell'edificio di 50 anni. Per quanto riguarda la manutenzione, si fa l'ipotesi che non siano richiesti particolari interventi;
- **impiantistica dell'edificio:** indica le componenti impiantistiche dell'edificio, riconducibili agli impianti idrico-sanitario, termico ed elettrico; si prevede una sostituzione completa degli impianti dopo 25 anni.

Le tabelle seguenti sintetizzano rispettivamente i sottosistemi edilizi dell'involucro e degli impianti con i relativi materiali costitutivi.

Unità costruttive	Materiali
Fondazioni	Platea in calcestruzzo armato (cemento, sabbia, ghiaia, rete elettrosaldata); guaina impermeabilizzante
Struttura portante	Legno di abete; piastre in ferro; viti torx; tiranti in acciaio
Tamponatura	Paglia mista di grano e orzo;
Intonaco interno	Intonaco realizzato in calce e sabbia; rete zincata
Intonaco esterno	Intonaco realizzato in calce, cemento e sabbia; polistirene espanso; sughero; rete zincata
Pavimentazione	Massetto in cemento e pomice; rete zincata
Copertura	Tavolato in legno di abete (2 strati); cellulosa; lamiera zincata; viti in acciaio; opere di lattoneria; sottotegola sintetico (Silcartex, 2 strati)
Infissi	Legno; vetro
Muri divisori	Legno di abete; incannucciatura in paglia di recupero; piastrelle ceramiche

Tabella 7: Unità costitutive dell'involucro edilizio

Impianti	Materiali
Idrico-sanitario	Condotte di distribuzione acqua potabile in HDPE
	Condotte fognarie e scarichi idrici in HDPE
	Sanitari in ceramica
	Rubinetteria in ottone cromato
	Contenitore in acciaio zincato
	Pannelli solari per la produzione di ACS in alluminio, lana di roccia, rame e vetro
Termico	Stufa a legna (tipo stube tirolese)
	Comignolo in lamiera
Elettrico	Cavi elettrici in rame, PVC

Tabella 8: Elementi costitutivi dell'impiantistica dell'abitazione



#### **4.5 Le fonti per il reperimento dei dati di inventario**

Per il reperimento dei dati primari di inventario è stato effettuato un sopralluogo all'Ecovillaggio di Pescomaggiore; questo ci ha permesso da un lato di avere informazioni dirette riguardo al cantiere dai costruttori stessi, dall'altro di toccare con mano l'entusiasmo degli abitanti e le effettive prestazioni degli edifici. Inoltre ci è stata fornita la documentazione relativa agli ordini effettuati, nonché la lista dei fornitori (→ *cd-rom allegato*).

L'architetto Paolo Robazza, dello studio BAG Officina Mobile, responsabile del progetto nonché presente durante il cantiere, è stato contattato più volte per avere informazioni dettagliate sulla parte tecnica.

Quando non è stato possibile stabilire le quantità utilizzando misure dirette si sono sfruttati manuali per l'edilizia (→ *bibliografia*), le schede tecniche dei prodotti reperite presso i siti web delle aziende e consulenze da parte di artigiani e professionisti.

In questo capitolo sono elencate, per ogni unità di processo inclusa nel modello LCA, le corrispondenze nelle banche dati utilizzate. Sono stati utilizzati dati provenienti dalla banche dati Ecoinvent, creata dall'Institute for Energy Technology ETH di Zurigo (CH).

Inoltre, è stato assegnato a ciascuno materiale il tipo di rifiuto generato.

#### 4.5.1 Fase di cantiere

I dati relativi alla fase di cantiere si riferiscono alle diverse tipologie di materiali utilizzati nell'involucro e per gli impianti, al loro trasporto al sito e ai consumi energetici quali alimentazione dei macchinari da cantiere e l'illuminazione.

<b>Materiali involucro edilizio</b>	<b>Corrispondenza SimaPRO</b>	<b>Fonte</b>	<b>Tipo di rifiuto</b>
Ghiaia	Gravel, unspecified, at plant U	Ecoinvent	Cement
Rete elettrosaldata	Reinforcing steel, at plant U	Ecoinvent	Steel
Guaina impermeabilizzante	Packaging film, LDPE, at plant U	Ecoinvent	Plastic
Legno di abete	Sawn timber, softwood, planed, kiln dried, at plant U	Ecoinvent	Wood
Acciaio	Steel, converter, low-alloyed, at plant U	Ecoinvent	Steel
Paglia di grano	Wheat straw extensive, at farm U	Ecoinvent	Compost
Paglia di orzo	Barley straw extensive, at farm U	Ecoinvent	Compost
Sabbia	Sand, at mine U	Ecoinvent	Cement
Cemento	Cement, unspecified, at plant U	Ecoinvent	Cement
Calce	Limestone, milled, packed, at plant U	Ecoinvent	Cement
Piastrelle ceramiche	Ceramic tiles, at regional storage U	Ecoinvent	Ceramics
Pomice	Exfoliated vermiculite, at plant U	Ecoinvent	Cement
Acciaio zincato	Steel, low alloyed, at plant U	Ecoinvent	Steel
Polistirene	Polystyrene foam slab, at plant U	Ecoinvent	Plastic
Sughero	Cork slab, at plant U	Ecoinvent	Inert
Sottotegola sintetico	Nylon 6, at plant U	Ecoinvent	Plastic
Fibra di cellulosa	Cellulose fibre, inclusive blowing in, at plant U	Ecoinvent	Paper
Vetro	Flat glass, coated, at plant U	Ecoinvent	Glass

Tabella 9: Fonti di dati relativi ai materiali dell'involucro

<b>Materiali impianti</b>	<b>Corrispondenza SimaPRO</b>	<b>Fonte</b>	<b>Tipo di rifiuto</b>
HDPE	Polyethylene, HDPE, granulate, at plant U	Ecoinvent	PE
Rame	Copper, at regional storage U	Ecoinvent	Copper
Ceramica	Sanitary ceramics, at regional storage U	Ecoinvent	Ceramics
Ottone cromato	Brass, at plant U	Ecoinvent	Brass
Lana di roccia	Rock wool, at plant U	Ecoinvent	Inert
Vetro	Flat glass, coated, at plant U	Ecoinvent	Glass
Laterizio refrattario	Refractory, fireclay, packed, at plant U	Ecoinvent	Brick
Acciaio zincato	Steel, low alloyed, at plant U	Ecoinvent	Steel
PVC	Polyvinylchloride, at regional storage U	Ecoinvent	Plastic

Tabella 10: Fonti di dati relativi ai materiali degli impianti

<b>Unità di processo</b>	<b>Corrispondenza SimaPRO</b>	<b>Fonte</b>	<b>Unità</b>
Acqua	Tap water, at user U	Ecoinvent	kg
Energia elettrica mix Italia	Electricity, low voltage, production IT, at grid U	Ecoinvent	kWh
Trasporto leggero su gomma	Transport, van <3,5t U	Ecoinvent	tkm
Trasporto pesante su gomma	Transport, lorry 16t U	Ecoinvent	tkm
Autobetoniera	Transport, lorry 16t U	Ecoinvent	tkm
Movimento terra con escavatore	Excavation, hydraulic digger U	Ecoinvent	m <sup>3</sup>

*Tabella 11: Fonti di dati relativi alle unità di processo*

#### 4.5.2 Fase d'uso

I dati relativi alla fase d'uso comprendono i consumi per il riscaldamento dell'abitazione e l'energia elettrica. Per quanto riguarda i primi, come visto nella parte di descrizione del progetto, l'unica fonte di riscaldamento è una stube legna. Come fonte per l'energia elettrica è stato considerato il mix energetico italiano, essendo l'edificio collegato alla rete con un allacciamento da 3 kW.

Per la cucina è utilizzata una bombola domestica, che si è ritenuto di poter trascurare, anche perché in un'abitazione tipo i consumi cucina costituiscono circa il 5% del totale (*fonte: elaborazioni dati Enea su dati Ministero Sviluppo Economico*).

<b>Unità di processo</b>	<b>Corrispondenza SimaPRO</b>	<b>Fonte</b>	<b>Unità</b>
Legna da ardere	Heat, mixed logs, at wood heater 6 kW U	Ecoinvent	MJ
Energia elettrica dalla rete	Electricity, low voltage, production IT, at grid U	Ecoinvent	kWh

*Tabella 12: Fonti di dati relativi alla fase d'uso*

#### 4.5.3 Fine vita

Ovviamente è difficile fare previsioni di qui a 50 anni; se però, come auspicabile, rimane lo spirito dei costruttori di oggi, ci si augura che tutto venga smontato e riutilizzato, e solo dopo riciclato o smaltito in discarica.

Proprio per questo non si è considerato l'abbattimento come soluzione finale, ma piuttosto un totale smontaggio a mano, volto ad una separazione delle diverse frazioni in previsione del loro riuso o riciclo. L'unica parte da distruggere con appositi macchinari è la platea in calcestruzzo.

Tutto il materiale verrà quindi trasportato mediante mezzi su gomma leggeri o pesanti ai siti di trattamento rifiuti, dove verranno separati, e in buona parte potranno essere riutilizzati o riciclati, e in piccola parte smaltiti in discarica.

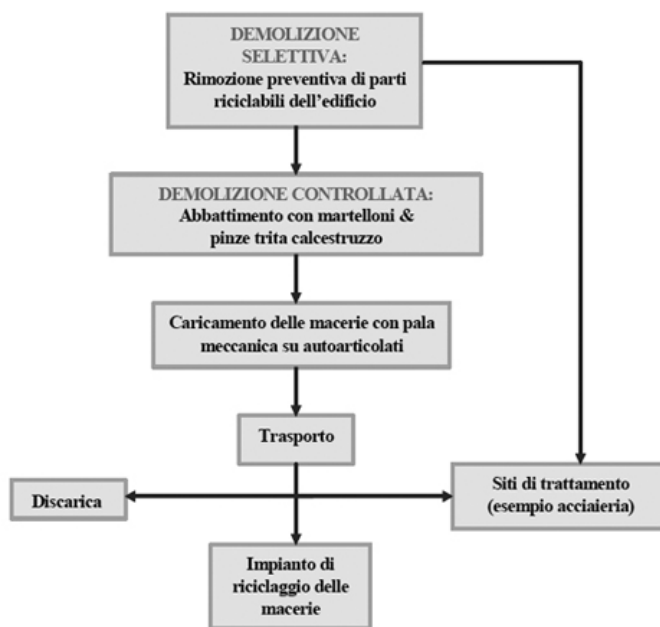


Figura 47: Diagramma di flusso relativo al fine vita

Mezzo utilizzato	Corrispondenza SimaPRO	Fonte	Unità
Abbattimento in cantiere	Excavation, hydraulic digger U	Ecoinvent	m <sup>3</sup>
Caricamento materiale abbattuto	Excavation, skid-steer loader U	Ecoinvent	m <sup>3</sup>
Trasporto leggero su gomma	Transport, van <3,5t U	Ecoinvent	tkm
Trasporto pesante su gomma	Transport, lorry 16t U	Ecoinvent	tkm

Tabella 13: Fonti di dati relativi alla fine vita

## **4.6 Inventario**

In questo capitolo vengono riportati tutti i dati in termini quantitativi utilizzati nel modello.

### **4.6.1 Trasporti**

Si riportano per prima cosa i dati generali relativi all'approvvigionamento dei materiali; nel seguito ci si riferirà a questi dati per il calcolo delle tonnellate per chilometro impiegate per ogni voce.

L'unità di misura è la tonnellata per chilometro (tkm), che rappresenta un carico di 1 t che viene trasportato per 1 km.

Per quanto riguarda la provenienza dei materiali:

- paglia: da Avezzano (AQ): 70 km;
- legno di abete: da provincia di Trento: 650 km;
- fibra di cellulosa: da Feistritz Drau (Austria): 810 km;
- tutto il resto: da zone entro un raggio di massimo 15 km.

In mancanza di dati precisi, si è fatta l'ipotesi che siano stati utilizzati:

- un'autobetoniera da 16 t per il trasporto del calcestruzzo;
- un camion da 16 t per il trasporto della paglia, del legno e della fibra di cellulosa; per il legno è stato considerato un solo viaggio con portasse tutto il quantitativo necessario;
- un furgone da 3,5 t per il trasporto di tutto il materiale acquistato nei dintorni di L'Aquila.

Per il viaggio di andata è stato considerato il carico e un conducente di 80 kg, mentre per il viaggio di ritorno il solo conducente:

$$tkm = (m + 0,080) \cdot d + 0,080 \cdot d \rightarrow tkm = (m + 0,160) \cdot d$$

dove  $m$  è il carico in tonnellate e  $d$  la distanza in chilometri.

Per ogni parte dell'involucro e per gli impianti si è fatta l'ipotesi che tutto il materiale proveniente dallo stesso posto e con lo stesso mezzo venisse portato in un solo viaggio (es. per le fondazioni, rete elettrosaldata e guaina impermeabilizzante vengono portate insieme, da L'Aquila, su un furgone).

#### 4.6.2 Fase di cantiere

Si riportano di seguito le tabelle di sintesi dei dati di inventario inseriti nel modello, suddivisi in base ai macro sistemi precedentemente individuati.

#### **Consumi energetici del cantiere**

I consumi energetici del cantiere sono essenzialmente relativi all'energia elettrica necessaria ad alimentare le macchine da cantiere e per l'illuminazione, e al gasolio consumato per l'alimentazione dello scavatore.

In mancanza di dati diretti, si riportano delle stime fornite da professionisti.

<b>Consumi cantieristici</b>	<b>Impiego</b>	<b>Quantità</b>
<b>Energia elettrica</b>	Illuminazione e attrezzi	1500 kWh
<b>Scavatore</b>	Terreno movimentato	200 m <sup>3</sup>

*Tabella 14: Consumi energetici in fase di cantiere*



*Figura 48: Impastatrice in funzione durante i lavori*

## Involucro edilizio

- Fondazioni:

- platea in calcestruzzo; essendo la superficie dell'abitazione di 70 m<sup>2</sup>, si è considerata la platea più grande di 20 cm per lato; la superficie della platea risulta quindi di circa 77 m<sup>2</sup>, con uno spessore di 0,30 m, per un volume di circa 23 m<sup>3</sup>.

Un metro cubo di calcestruzzo tipicamente usato per fondazioni è composto da 0,4 m<sup>3</sup> di sabbia (peso specifico: 1700 kg/m<sup>3</sup>), 0,8 m<sup>3</sup> di ghiaia (peso specifico: 1500 kg/m<sup>3</sup>), 300 kg di cemento e 150 l di acqua;

- doppia rete elettrosaldata  $\Phi 8/15 \times 15$  su tutta la superficie della platea, sia all'intradosso che all'estradosso, 5,3 kg/m<sup>2</sup>;
- guaina impermeabilizzante in polietilene.

	Materiali	Massa [kg]	Trasporto [tkm]
FONDAZIONI	Cemento	7.000	835
	Ghiaia	33.000	
	Sabbia	12.000	
	Acqua	3.500	
	Rete elettrosaldata	816	15
	Guaina impermeabilizzante	30	

Tabella 15: Tipologia e quantità di materiali utilizzati per le fondazioni



Figura 49: Vista della platea in calcestruzzo armato



- Struttura portante + portico:
  - travi, travetti e pilastri in legno di abete; la lista esatta è stata fornita direttamente dal carpentiere, per un totale di circa 8,80 m<sup>3</sup>; il peso specifico del legno di abete si è assunto pari a 450 kg/m<sup>3</sup>;
  - piastre, viti torx, bulloni, scarpette e tiranti, di cui è stata fornita la lista esatta dell'ordine alla ferramenta. Tutti i pezzi sono stati considerati di acciaio, dal peso specifico pari a 7850 kg/m<sup>3</sup>;

STRUTTURA PORTANTE	Materiali	Massa [kg]	Trasporto [tkm]
	Legno di abete	3.960	2.618
	Acciaio	140	5

Tabella 16: Tipologia e quantità di materiali utilizzati per la struttura portante e il portico

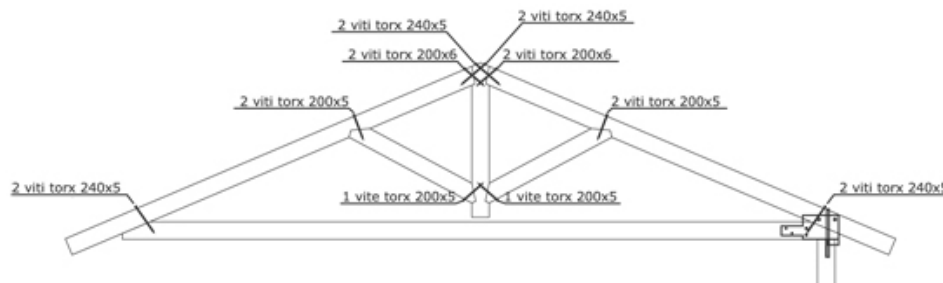


Figura 50: Schema capriata



Figura 51: La struttura portante completata

- Tamponatura:
  - la tamponatura è in balle di paglia mista di grano e di orzo, per cui se ne considera metà di un tipo e metà dell'altro. Per l'edificio ne sono state utilizzate circa 300, pesanti circa 30 kg l'una.

TAMPONATURA	Materiali	Massa [kg]	Trasporto [tkm]
	Balle di paglia di grano	4.500	641
	Balle di paglia di orzo	4.500	

*Tabella 17: Tipologia e quantità di materiali utilizzati per la tamponatura*



*Figura 52: Acquisto delle balle di paglia*



*Figura 53: Tamponatura completata e rete zincata*

- Pavimentazione:
  - è stato realizzato un massetto in opera costituito da pomice impastata con cemento ed acqua, per uno spessore di circa 5 cm; **NOTA:** siccome la pomice non è presente nella banca data del SimaPRO, è stata sostituita con la vermiculite, un altro inerte dalle prestazioni e caratteristiche simili;
  - all'interno del massetto è stata disposta una rete zincata  $\Phi 2/5 \times 5$ , 0,4 kg/m<sup>2</sup>.

PAVIMENTAZIONE	Materiali	Massa [kg]	Trasporto [tkm]
	Cemento	840	21
	Pomice	370	
	Acqua	840	
	Rete zincata	23	

*Tabella 18: Tipologia e quantità di materiali utilizzati per la pavimentazione*



*Figura 54: Pavimentazione in pomice*

- **Infissi:** sono realizzati con telaio in legno di abete e doppio vetro (vetro unito al perimetro, 4+4, massa per unità di superficie 20 kg/m<sup>2</sup>);

INFISSI	Materiali	Massa [kg]	Trasporto [tkm]
	Legno di abete	70	6
	Doppio vetro	203	

Tabella 19: : Tipologia e quantità di materiali utilizzati per gli infissi

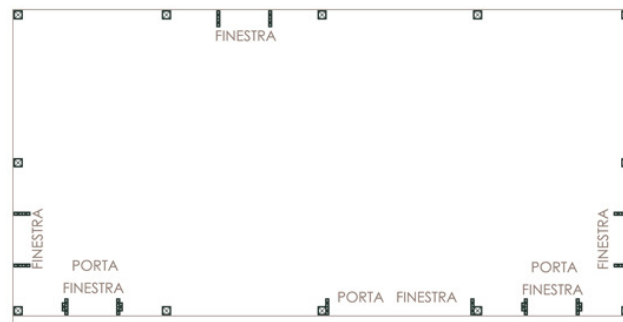


Figura 55: Disposizione e tipologia degli infissi



Figura 56: L'ampia porta vetrata di ingresso

- **Copertura:**

- il manto di copertura è costituito da 30 lastre di lamiera zincata (4,00x0,90 m, spessore 1 mm), massa per unità di superficie pari a 9,6 kg/m<sup>2</sup>; le lastre sono fissate con delle viti in acciaio da 10 cm alla struttura lignea sottostante;
- la struttura in legno è costituita da travi di varie dimensioni in abete piallato, come da disegno e nota carpentiere allegato; il volume di legno complessivo è 10,18 m<sup>3</sup>, compreso sfrido;
- come isolante termico inserito nei “cassetti” è stata utilizzata fibra di cellulosa Thermofloc con densità di 45 kg/m<sup>3</sup>. Il volume da riempire è pari a 23 m<sup>3</sup> circa;
- sottotegola sintetica (film in polipropilene) modello “Silcartex, Proton evolution 135”, in 2 strati, massa per unità di superficie 135 g/m<sup>2</sup>;
- opere di lattoneria; questa voce comprende le gronde zincate, i relativi supporti e i profili bordo tetto.

COPERTURA	Materiali	Massa [kg]	Trasporto [tkm]
	Legno di abete	4.581	3.028
	Fibra di cellulosa	1.035	968
	Sottotegola sintetica	30	22
	Lamiera zincata	1.037	
	Viti in acciaio	8	
	Opere di lattoneria	200	

Tabella 20: Tipologia e quantità di materiali utilizzati per la copertura

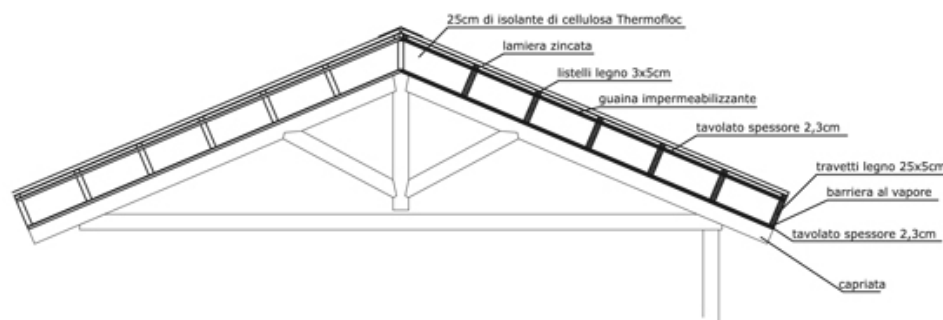


Figura 57: Schema della copertura



*Figura 58: Costruzione dei "cassetti" del tetto, da riempire con la fibra di cellulosa*



*Figura 59: Insufflaggio della fibra di cellulosa tra i 2 tavolati*



*Figura 60: Fissaggio delle lastre di acciaio zincato*

- Intonaco interno ed esterno: per il calcolo della superficie da intonacare si è utilizzato il metodo “vuoto per pieno” comunemente usato in edilizia, ovvero è stata esclusa solo la porta larga 2,50 m, mentre le altre aperture sono state trascurate. L'altezza media è stata considerata di 3,00 m sul lato lungo e di 3,50 m su quello corto.
  - rete zincata, presente su entrambi i lati,  $\Phi 1/5 \times 5$ , peso specifico di  $0,3 \text{ kg/m}^2$  per una superficie complessiva di  $197,2 \text{ m}^2$ ;
  - intonaco interno distribuito su una superficie di  $92,1 \text{ m}^2$ , con uno spessore di 2 cm per un totale di circa  $1,85 \text{ m}^3$ . Esperienze di cantiere insegnano che per preparare  $1 \text{ m}^3$  di impasto di calce sono necessari:  $1 \text{ m}^3$  di sabbia, 400 kg di calce e 300 l di acqua;
  - intonaco esterno distribuito su una superficie di  $105,1 \text{ m}^2$ , con uno spessore di 2 cm per un totale di circa  $2,1 \text{ m}^3$ . Esperienze di cantiere insegnano che per preparare  $1 \text{ m}^3$  di impasto di calce e cemento sono necessari:  $1 \text{ m}^3$  di sabbia, 260 kg di calce, 140 di cemento e 300 l di acqua;



*Figura 61: Stesura dell'intonaco esterno*

- su tutto il perimetro esterno, a partire da terra, è presente uno strato di polistirene espanso alto 40 cm e spesso 3 cm, per un totale di circa  $0,4 \text{ m}^3$  di materiale, con un peso specifico di  $40 \text{ kg/m}^3$ ;

- su tutto il perimetro esterno, sopra le architravi, è presente uno strato di sughero alto 30 cm e spesso 3 cm, per un totale di circa 0,3 m<sup>3</sup> di materiale, con un peso specifico di 140 kg/m<sup>3</sup>;

<b>INTONACI</b>	<b>Materiali</b>	<b>Massa [kg]</b>	<b>Trasporto [tkm]</b>
	Rete zincata	60	106
	Sabbia	5.200	
	Calce	1.290	
	Cemento	300	
	Acqua	1.200	
	Sughero	45	
	Polistirene espanso	16	

Tabella 21: : Tipologia e quantità di materiali utilizzati per gli intonaci



Figura 62: Stesura dell'intonaco esterno, in alto è visibile lo strato di sughero



Muri divisori: sono realizzati con un'intelaiatura in legno (già compresa nel capitolo strutturale), tamponata da entrambi i lati con una pannellatura in perline di legno dello spessore di 2 cm, fino ad una altezza di 2,70 m; il bagno e il relativo disimpegno sono controsoffittati con una pannellatura in legno. Le pareti dell'angolo cucina e del bagno (quelle a diretto contatto con i sanitari) sono rivestite con piastrelle di ceramica fino ad una altezza di 2 m. Le porte sono anch'esse realizzate in legno d'abete.

- le pareti in legno hanno una superficie (su ambo i lati, vuoto per pieno) di circa 90 m<sup>2</sup>, e quindi un volume di 1,8 m<sup>3</sup>;
- la superficie complessiva ricoperte con piastrelle in ceramica vale circa 18 m<sup>2</sup>, e si considera una massa per unità di superficie pari a 30 kg/m<sup>2</sup>;
- controsoffitto di 8 m<sup>2</sup> con pannelli di 2,3 cm di spessore, per un volume complessivo di 0,184 m<sup>3</sup>;

MURI DIVISORI	Materiali	Massa [kg]	Trasporto [tkm]
	Legno di abete	893	590
	Piastrelle ceramiche	540	11

Tabella 22: Tipologia e quantità di materiali utilizzati per i muri divisorii



Figura 63: I muri divisorii in legno, contenenti i tubi degli impianti

## Impianti

I valori riportati sono considerati a corpo, e non con un calcolo analitico, in quanto ci si è basati sulla diretta esperienza di artigiani.

Tenendo conto del fatto che la vita utile degli impianti è di circa 25 anni, tutti i valori sono stati raddoppiati in previsione di un loro possibile rifacimento.

- Impianto idrico sanitario:
  - distribuzione dell'acqua potabile e sanitaria, condotte fognarie, sono realizzate in HDPE (polietilene, peso specifico  $1000 \text{ kg/m}^3$ );
  - sanitari in ceramica (bidè 15 kg, piatto doccia 35 kg, lavandino 20 kg, vaso 20 kg, lavabo da cucina 40 kg);
  - rubinetteria realizzata in ottone cromato;
  - sul tetto verrà installato un impianto a pannelli solari termici per la produzione di acqua calda sanitaria. Verrà quindi predisposto un apposito accumulatore di acqua calda nel bagno.

	Materiali	Massa [kg]	Trasporto [tkm]
<b>IMPIANTO IDRICO SANITARIO</b>	HDPE	100	9
	Ceramica sanitaria	260	
	Ottone cromato	16	
	Acciaio zincato	2	
	Lana di roccia	10	
	Rame	24	
	Vetro	30	

Tabella 23: Materiali dell'impianto idrico-sanitario

- Impianto elettrico: è stato realizzato un classico impianto elettrico.

	Materiali	Massa [kg]	Trasporto [tkm]
<b>IMPIANTO ELETTRICO</b>	Rame	6	3
	PVC	30	

Tabella 24: Materiali dell'impianto elettrico

- Impianto termico: è stata prevista l'installazione di una stube a legna (per questo elemento non è previsto il rifacimento dopo 25 anni), con lo scarico realizzato tramite un tubo in acciaio che termica con un camino sul tetto, sempre in acciaio zincato.

IMPIANTO TERMICO	Materiali	Massa [kg]	Trasporto [tkm]
	Laterizio refrattario	350	8
	Acciaio zincato	20	

*Tabella 25: Materiali dell'impianto termico*



*Figura 64: Installazione dell'impianto solare termico*

#### 4.6.3 Fase d'uso

L'analisi è comprensiva dei seguenti dati d'input per quel che concerne i consumi energetici in fase d'uso:

- fabbisogno di energia utile; deve essere calcolato con appositi calcoli da un tecnico in fase di progetto, con un apposito software. Purtroppo non è stato possibile ottenere questo valore. Si è fatto perciò riferimento al sito web dell'Ecovillaggio, che riporta che gli edifici sono di classe A. Siccome un edificio per ricadere in classe A deve avere un fabbisogno di energia  $<30 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{anno})$ , ma se fosse  $<10 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{anno})$  sarebbe classificato come casa passiva, si è ritenuto opportuno considerare un valore di  $20 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{anno})$ . Come già detto in precedenza, l'intero fabbisogno di energia in questa casa è fornito da una stube a legna; considerando il potere calorifico della legna secca pari a  $4 \text{ kWh}/\text{kg}_{\text{legna}}$ , e un rendimento della stube del 50%, possiamo calcolare la quantità annua di legna necessaria: 600 kg. Il quantitativo di energia elettrica per il riscaldamento è nullo;
- si ipotizza che il fabbisogno energetico per la produzione di acqua calda sanitaria sia soddisfatto completamente dall'impianto solare termico;
- per la quantità di energia elettrica utilizzata si è fatto riferimento ad uno studio realizzato da Gianluca Ruggieri per conto del gruppo eERG del Politecnico di Milano ( $\rightarrow$  *bibliografia*); dopo una serie di indagini, si stima un consumo in Italia di circa  $31 \text{ kWh}/\text{m}^2$  all'anno, il che significa, nel nostro caso, 1736 kWh/anno. Di questi, circa il 20% sono imputabili a dispositivi di riscaldamento dell'acqua, che abbiamo considerato provenire tutta dall'impianto solare termico. Complessivamente quindi, i consumi imputabili agli usi elettrici obbligati sono stimati in 1389 kWh/anno, che significa, per unità di superficie,  $24,8 \text{ kWh}/(\text{anno} \cdot \text{m}^2)$ .

Fonte energetica	Quantità	Unità di misura
Energia elettrica dalle rete	1388	kWh/anno
Legna per il riscaldamento	4032	MJ/anno

Tabella 26: Consumo di energia elettrica

#### 4.6.4 Fine vita

Come visto in precedenza, nella fase di fine vita si prevede una totale demolizione selettiva, una sorta di “smontaggio” completo dell’abitazione, ad eccezione del pavimento e della platea in calcestruzzo, per i quali è necessario l’uso di appositi macchinari (scavatore).

La demolizione selettiva è mirata ad una separazione dei materiali nelle diverse frazioni, che possono poi essere sottoposte a trattamenti di riuso o riciclaggio.

Il tutto viene caricato su camion o furgoni mediante una pala meccanica, e trasportato presso gli appositi centri di selezione, riciclo o smaltimento, che si ipotizzano essere tutti a L’Aquila, a 15 km di distanza.

<b>Consumi demolizione</b>	<b>Impiego</b>	<b>Quantità</b>
Demolizione selettiva	Attrezzi e illuminazione	100 kWh
Abbattimento in cantiere	Volume demolito	100 m <sup>3</sup>
Caricamento materiale abbattuto	Volume caricato	100 m <sup>3</sup>

*Tabella 27: Consumi energetici legati all’abbattimento in cantiere*

In particolare, si è supposto di operare in questo modo:

- le macerie, ovvero resti di platea di fondazione (calcestruzzo armato), pavimento, intonaci, rivestimento in piastrelle, mattoni refrattari della stube, ceramica sanitaria e altri inerti, vengono trasportate ad un frantoio, dove si separa l’acciaio. L’acciaio (l’1% del totale) verrà riciclato in rete elettrosaldata, gli inerti (89%) verranno utilizzati come aggregati riciclati, ad esempio, per sottofondi stradali, mentre il 10% si considerano scarto e verrà smaltito in discarica;
- il legno viene riutilizzato per il 50% esattamente com’è, mentre la parte restante viene smaltita come combustibile in un impianto di termovalorizzazione;
- i materiali ferrosi (acciaio e lamiera zincata) vengono interamente riciclati in un impianto apposito, così come quelli non ferrosi (ottone e rame);
- la paglia viene utilizzata come compost;

- il vetro può essere interamente riciclato in un impianto di riciclo del vetro, e trasformato in altro vetro bianco;
- la carta, o meglio la fibra di cellulosa, viene bruciata in un termovalorizzatore.

Di seguito si riportano i calcoli svolti per stabilire le frazioni in peso di ogni tipologia di rifiuto, utilizzati nello “Scenario di smaltimento”.

Rifiuti	Massa [kg]	%
Macerie	67.614	75,9%
Legno	9.504	5,3%
		5,3%
Ferro	1.467	1,6%
Non ferro	46	0,1%
Materiali plastici	176	0,2%
Compost	9.000	10,1%
Vetro	233	0,3%
Carta	1.035	1,2%

*Tabella 28: Frazione delle varie tipologie di rifiuto*

#### **4.7 Analisi degli impatti e interpretazione dei risultati**

Come già visto nel capitolo sull'LCA (→ *capitolo 3.3*), l'ultima fase consiste nell'analisi degli impatti e interpretazione dei risultati.

Le valutazioni sono state fatte confrontando i risultati di tre metodi diversi:

- **Eco-indicator 99**, in cui le categorie di impatto confluiscono in tre categorie di danno ambientale: Human Health, Ecosystem quality, Resources;
- **EPS 2000**, in cui le categorie di impatto confluiscono in quattro categorie di danno ambientale: Human Health, Ecosystem Production Capacity, Abiotic Stock Resources, Biodiversity;
- **EDIP**, in cui si considerano le sole categorie di impatto.

Nella fase di **caratterizzazione** i differenti contributi dei materiali vengono aggregati in un determinato effetto ambientale e rapportati ad una sostanza (presa come riferimento).

I flussi registrati nell'analisi dell'inventario vengono moltiplicati per i rispettivi fattori di equivalenza e sommati tra loro: il potenziale d'impatto così determinato rappresenta la misura di un possibile danno ambientale.

Durante la **normalizzazione**, il potenziale d'impatto determinato viene messo in relazione con un valore di riferimento all'interno della stessa area.

Normalizzare in definitiva significa dividere la quantità calcolata di una categoria d'impatto per la quantità totale della stessa categoria che si verifica in uno specifico arco temporale e in una determinata zona.

La **ponderazione** o pesatura consiste nell'attribuire un peso di importanza ai diversi effetti causati dal sistema, in modo che possano essere comparati tra loro per effettuare successivamente una ulteriore aggregazione dei dati.

Con la pesatura si determina alla fine un indice assoluto, il cosiddetto eco-indicatore, che esprime in modo complessivo le prestazioni ambientali del sistema.

#### 4.7.1 Metodo ECO-Indicator 99

Si riportano di seguito le tabelle e i grafici ottenuti utilizzando il metodo ECO-Indicator 99.

#### Caratterizzazione

Categoria d'impatto	Unità	FASE PRE-USO	FASE D'USO	FINE VITA	Totale
Carcinogens	DALY	3,11E-03	1,22E-03	-1,09E-04	4,22E-03
Resp. organics	DALY	3,30E-05	3,15E-05	2,58E-06	6,71E-05
Resp. inorganics	DALY	4,03E-02	3,14E-02	-1,03E-03	7,06E-02
Climate change	DALY	-1,94E-03	1,08E-02	3,45E-04	9,17E-03
Radiation	DALY	3,48E-06	1,06E-06	-9,40E-08	4,45E-06
Ozone layer	DALY	1,19E-06	4,05E-06	1,62E-07	5,41E-06
Ecotoxicity	PAF*m2yr	1.610,0	4.710,0	-19,6	6.300,0
Acidification/ Eutrophication	PDF*m2yr	699,0	1.240,0	80,1	2.010,0
Land use	PDF*m2yr	9.940,0	2.240,0	-559,0	11.600,0
Minerals	MJ surplus	3.940,0	1.450,0	-188,0	5.210,0

Tabella 29: Valori per le categorie d'impatto con il metodo ECO-Indicator 99

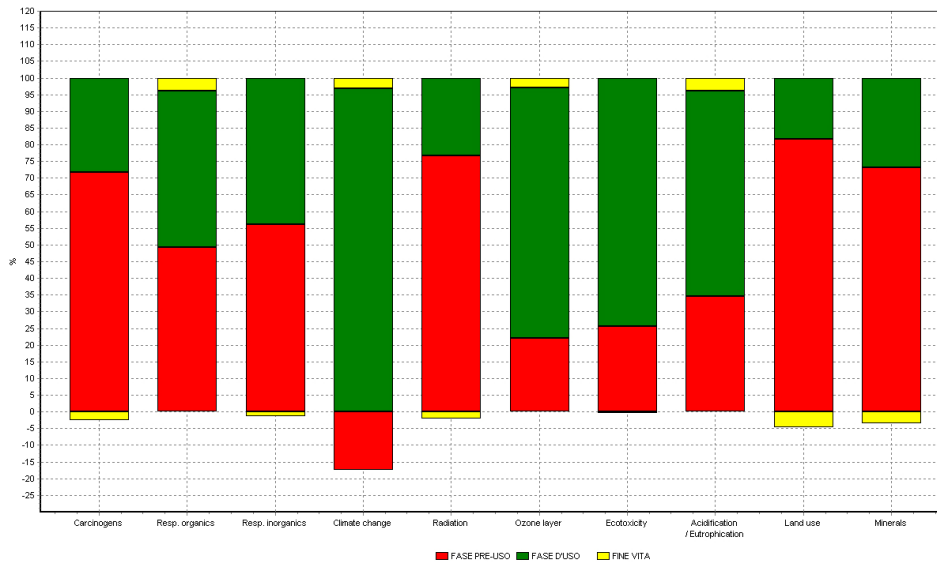


Grafico 1: Caratterizzazione degli impatti con il metodo ECO-Indicator 99

Analizzando il grafico si nota una netta predominanza delle fasi di pre-uso e d'uso rispetto a quella di fine vita, che anzi in certi casi risulta negativa per via delle ipotesi fatte in fase di inventario riguardo al riuso e riciclo dei materiali.



Di particolare rilevanza il fatto che la fase di pre-uso sia negativa per quanto riguarda il “climate change”: ciò è dovuto all’utilizzo di biomasse (paglia e legno) che durante la crescita assorbono anidride carbonica, risultando un guadagno in termini di effetto serra.

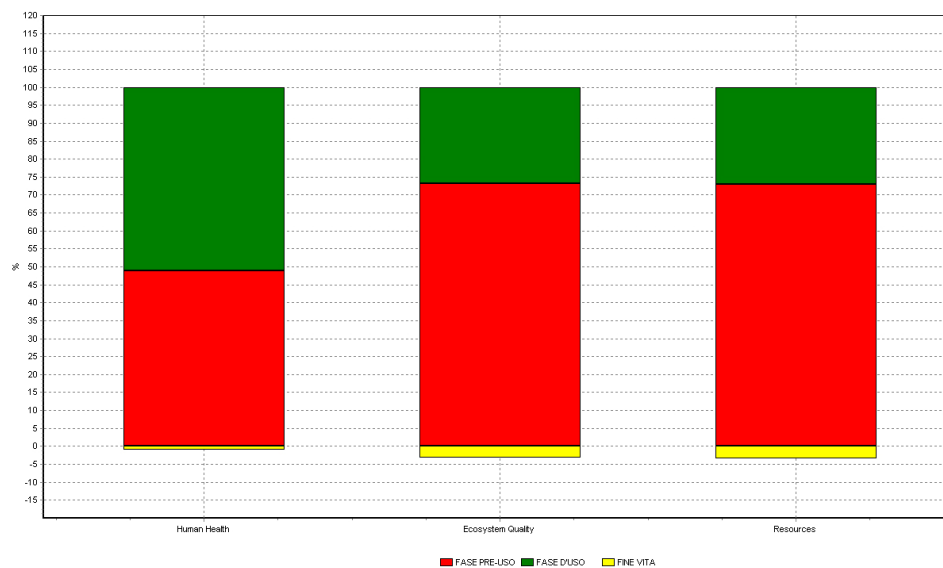
La fase di pre-uso risulta particolarmente significativa nella voce “land use”, e ciò si spiega per l’uso di suolo destinato alla coltivazione dei cereali.

Si consideri che sono necessari circa 2,5 ha di terreno coltivati a grano per ottenere la paglia necessaria alla casa oggetto di studio.

Dall’analisi di valutazione dei danni appare chiaro come la fase più impattante sia quella di pre-uso per le categorie “ecosystem quality” e “resources”, mentre risultino circa uguali quelle di pre-uso e d’uso per la categoria “human health”.

Categoria di danno	Unità	Totale	FASE PRE-USO	FASE D'USO	FINE VITA
Human Health	DALY	8,41E-02	4,15E-02	4,34E-02	-7,96E-04
Ecosystem Quality	PDF*m2yr	1,43E+04	1,08E+04	3,94E+03	-4,81E+02
Resources	MJ surplus	5,21E+03	3,94E+03	1,45E+03	-1,88E+02

Tabella 30: Valori per le categorie di danno con il metodo ECO-Indicator 99



Analizzando 1 p ciclo di vita "CICLO VITA EDIFICIO"; Metodo: Eco-indicator 99 (I) V2.1 / Europe E1 99 (IA) / valutazione dei danni

Grafico 2: Valutazione dei danni con il metodo ECO-Indicator 99

## Normalizzazione

Categoria d'impatto	Unità	FASE PRE-USO	FASE D'USO	FINE VITA	Totale
Carcinogens		3,76E-01	1,48E-01	-1,32E-02	5,11E-01
Resp. organics		3,99E-03	3,81E-03	3,12E-04	8,11E-03
Resp. inorganics		4,87E+00	3,80E+00	-1,25E-01	8,55E+00
Climate change		-2,34E-01	1,30E+00	4,18E-02	1,11E+00
Radiation		4,21E-04	1,28E-04	-1,14E-05	5,38E-04
Ozone layer		1,44E-04	4,91E-04	1,96E-05	6,54E-04
Ecotoxicity		3,58E-02	1,04E-01	-4,35E-04	1,40E-01
Acidification/ Eutrophication		1,55E-01	2,74E-01	1,78E-02	4,47E-01
Land use		2,21E+00	4,97E-01	-1,24E-01	2,58E+00
Minerals		2,67E+01	9,85E+00	-1,27E+00	3,53E+01

Tabella 31: Valori normalizzati con il metodo ECO-Indicator 99, per categorie d'impatto

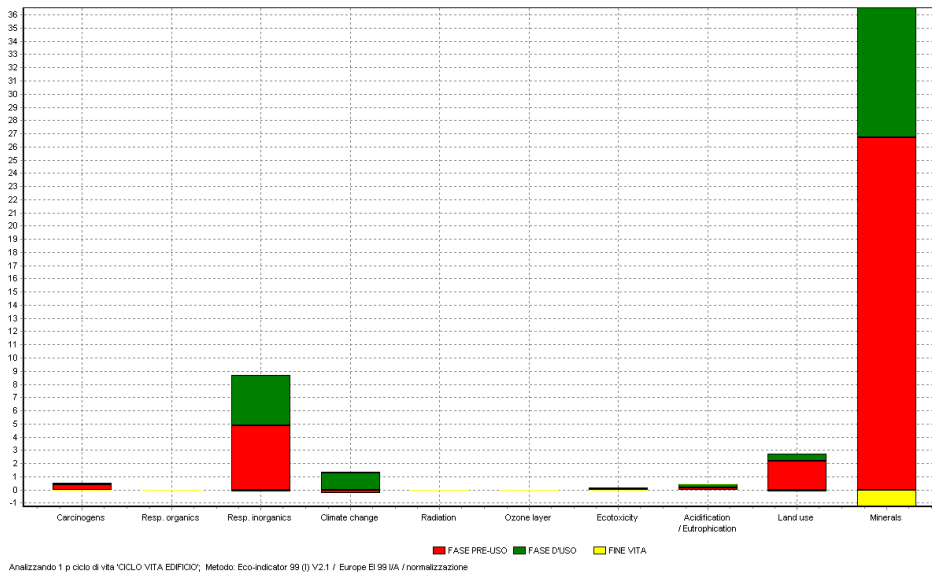
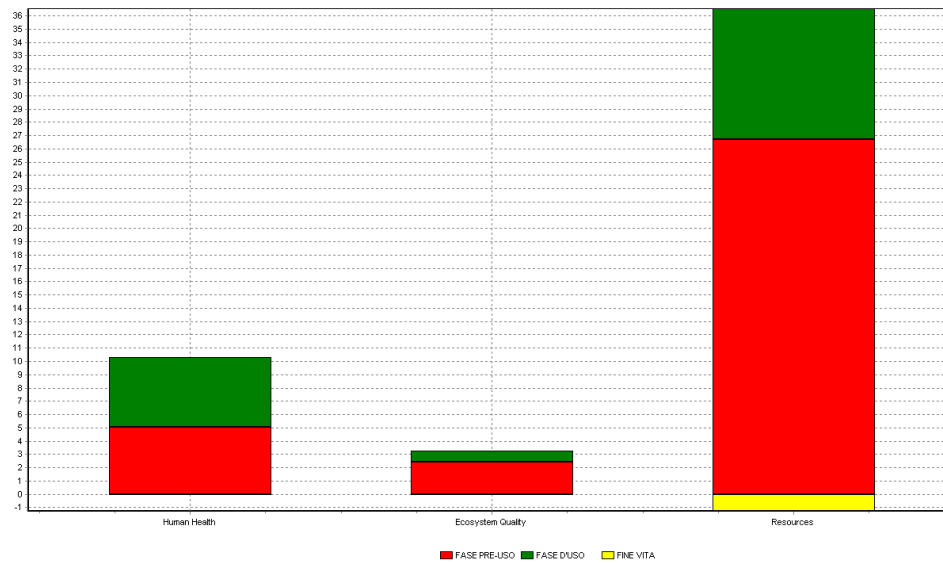


Grafico 3: Valori normalizzati con il metodo ECO-Indicator 99, per categorie d'impatto

Categoria di danno	Unità	Totale	FASE PRE-USO	FASE D'USO	FINE VITA
Human Health		1,02E+01	5,02E+00	5,25E+00	-9,63E-02
Ecosystem Quality		3,17E+00	2,40E+00	8,76E-01	-1,07E-01
Resources		3,53E+01	2,67E+01	9,85E+00	-1,27E+00

Tabella 32: Valori normalizzati con il metodo ECO-Indicator 99, per categorie di danno



Analizzando 1 p ciclo di vita 'OCLO VITA EDIFICIO', Metodo: Eco-indicator 99 (0) V2.1 / Europe BI 99 IIA / normalizzazione

Grafico 4: Valori normalizzati con il metodo ECO-Indicator 99, per categorie di danno

## Pesatura

Categoria d'impatto	Unità	FASE PRE-USO	FASE D'USO	FINE VITA	Totale
Carcinogens	Pt	151,0	59,2	-5,3	204,0
Resp. organics	Pt	1,6	1,5	0,1	3,3
Resp. inorganics	Pt	1.950,0	1.520,0	-50,1	3.420,0
Climate change	Pt	-93,7	521,0	16,7	444,0
Radiation	Pt	0,2	0,1	0,0	0,2
Ozone layer	Pt	0,1	0,2	0,0	0,3
Ecotoxicity	Pt	14,3	41,8	-0,2	55,9
Acidification/ Eutrophication	Pt	62,0	110,0	7,1	179,0
Land use	Pt	883,0	199,0	-49,6	1.030,0
Minerals	Pt	5.340,0	1.970,0	-255,0	7.050,0
<b>Totale</b>	<b>Pt</b>	<b>8.310,0</b>	<b>4.420,0</b>	<b>-336,0</b>	<b>12.400,0</b>

Tabella 33: Punteggio totale con il metodo ECO-Indicator 99

Il danno totale vale 12.400 Pt, così ripartito:

- fase di pre-uso: 67 %;
- fase d'uso: 36 %;
- fine vita: -3 %.

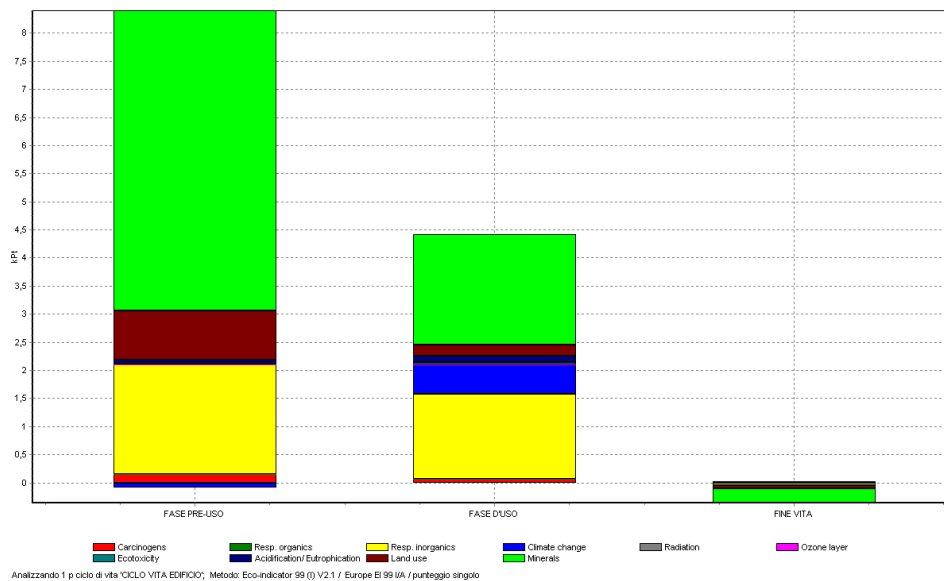


Grafico 5: Punteggio totale con il metodo ECO-Indicator 99

Contrariamente a quanto accade negli edifici tradizionali quindi, in questo caso è la fase di pre-uso a risultare la più significativa: questo non perché la fase di pre-uso sia particolarmente impattante, ma piuttosto perché è quella d'uso ad esserlo molto poco.

Vediamo allora nella fase di pre-uso cosa risulta di maggior impatto.

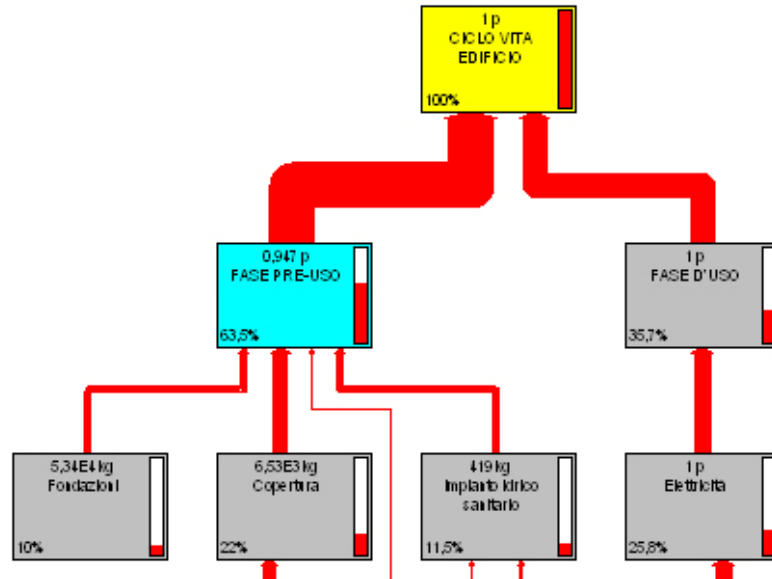
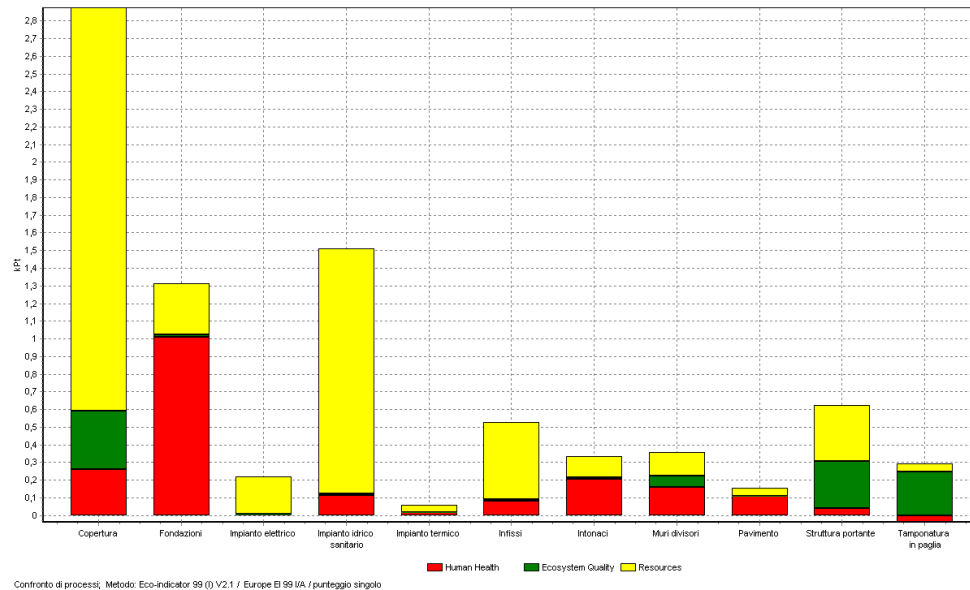


Figura 65: Albero con le percentuali d'impatto



Confronto di processi, Metodo: Eco-indicator 99 (0) V2.1 / Europe El 99 UA / punteggio singolo

Grafico 6: Punteggio singolo per categoria di danno

Si nota che delle parti che compongono l'edificio, quella che risulta di maggior impatto è la copertura; ciò è comprensibile, se si considerano i trasporti dei materiali (dal Trentino e dall'Austria), ma soprattutto che il tetto è attualmente ricoperto di acciaio zincato.

Sul SimaPRO possiamo verificare i contributi dell'inventario nelle diverse fasi; vediamo quindi i contributi delle varie parti che compongono la copertura.

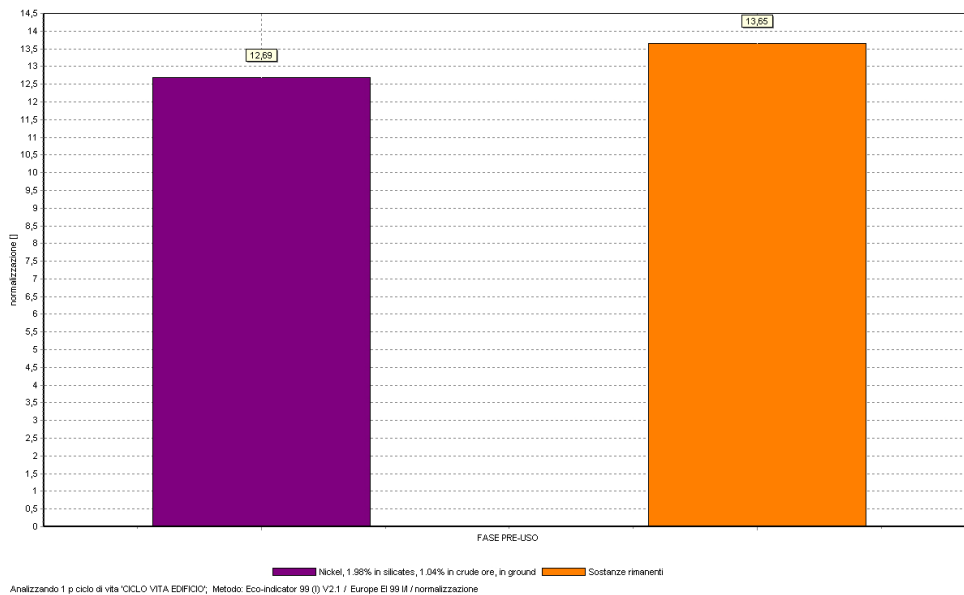


Figura 66: Contributo dei materiali della copertura alla categoria d'impatto "resources"

Il grafico conferma l'ipotesi sull'acciaio zincato; infatti il nickel, il maggior contributo all'impatto della copertura, viene utilizzato nella produzione dell'acciaio.

Ne risulta che dal punto di vista dell'impatto ambientale la copertura in acciaio zincato è decisamente negativa.

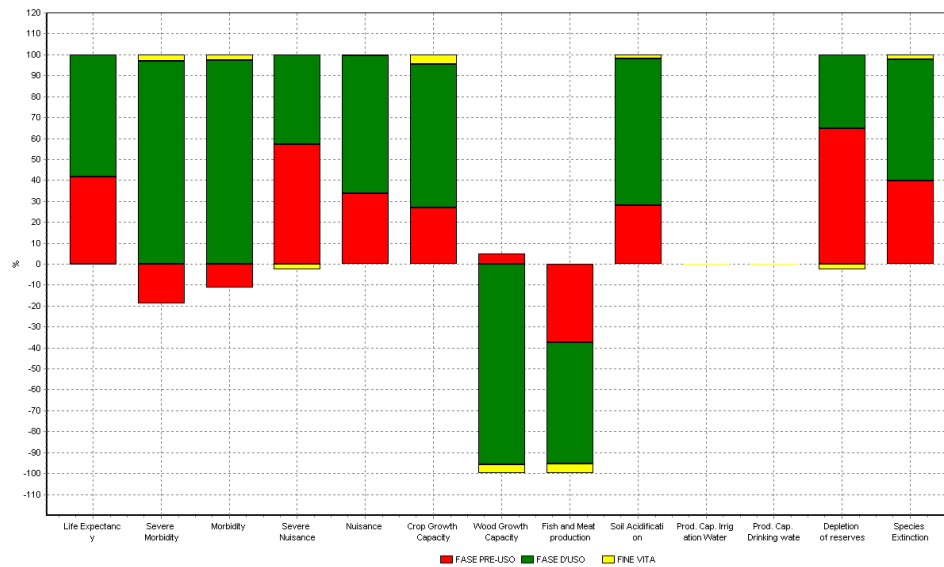
#### 4.7.2 Metodo EPS 2000

Si riportano di seguito le tabelle e i grafici ottenuti utilizzando il metodo EPS 2000.

#### Caratterizzazione

Categoria d'impatto	Unità	Totale	FASE PRE-USO	FASE D'USO	FINE VITA
Life Expectancy	PersonYr	1,68E-01	7,01E-02	9,84E-02	-3,34E-04
Severe Morbidity	PersonYr	1,56E-02	-3,66E-03	1,86E-02	6,26E-04
Morbidity	PersonYr	3,56E-02	-4,61E-03	3,90E-02	1,15E-03
Severe Nuisance	PersonYr	2,82E-02	1,66E-02	1,24E-02	-7,42E-04
Nuisance	PersonYr	3,08E+00	1,04E+00	2,03E+00	1,43E-02
Crop Growth Capacity	kg	2,58E+02	6,90E+01	1,77E+02	1,18E+01
Wood Growth Capacity	kg	-2,54E+03	1,36E+02	-2,57E+03	-1,09E+02
Fish and Meat production	kg	-1,02E+01	-3,81E+00	-5,92E+00	-4,82E-01
Soil Acidification	H+ eq.	7,60E+02	2,13E+02	5,33E+02	1,36E+01
Prod. Cap. Irrigation Water	kg	x	x	x	x
Prod. Cap. Drinking water	kg	x	x	x	x
Depletion of reserves	ELU	5,80E+04	3,85E+04	2,11E+04	-1,52E+03
Species Extinction	NEX	1,45E-09	5,78E-10	8,44E-10	3,16E-11

Tabella 34: Valori per le categorie d'impatto con il metodo EPS 2000



Analizzando 1 p ciclo di vita 'CICLO VITA EDIFICIO'; Metodo: EPS 2000 V2.1 / EPS / Caratterizzazione

Grafico 7: Caratterizzazione degli impatti con il metodo EPS 2000

Nel grafico si nota un consumo molto ridotto di combustibili fossili in fase d'uso ("depletion of reserves"), ma soprattutto i valori negativi di "wood growth capacity" e di "fish and meat capacity, che troviamo confermati anche nel valore negativo della categoria di danno "ecosystem production capacity". Si possono fare diverse ipotesi sul motivo, ma non si deve dimenticare che in questa fase si sta parlando di valori percentuali, e non assoluti. In effetti, come si vedrà in seguito nella fase di pesatura, queste voci risulteranno praticamente nulle. Certo, è pur sempre un beneficio, e probabilmente ciò è legato al fatto che per il primo si produce materiale da costruzione e mangime nello stesso step (la coltivazione di cereali), e per il secondo che non è necessario pagare per i danni provocati ai boschi (l'EPS valuta la disponibilità a pagare per rimediare al danno provocato), visto che è stato utilizzato del legno.

Categoria di danno	Unità	Totale	FASE PRE-USO	FASE D'USO	FINE VITA
Human Health	ELU	1,68E+04	5,82E+03	1,09E+04	3,97E+01
Ecosystem Production Capacity	ELU	-6,55E+01	1,41E+01	-7,67E+01	-2,93E+00
Abiotic Stock Resource	ELU	5,80E+04	3,85E+04	2,11E+04	-1,52E+03
Biodiversity	ELU	1,60E+02	6,36E+01	9,29E+01	3,47E+00

Tabella 35: Valori per le categorie di danno con il metodo EPS 2000

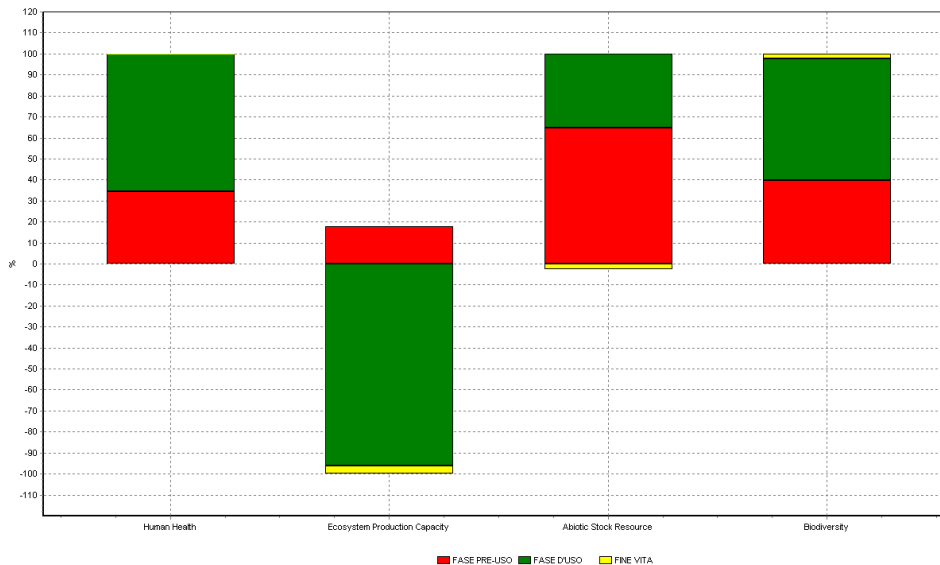


Grafico 8: Valutazione dei danni con il metodo EPS 2000



## Pesatura

Categoria d'impatto	Unità	FASE PRE-USO	FASE D'USO	FINE VITA	Totale
Life Expectancy	Pt	5,96E+03	8,36E+03	-2,84E+01	1,43E+04
Severe Morbidity	Pt	-3,66E+02	1,86E+03	6,26E+01	1,56E+03
Morbidity	Pt	-4,61E+01	3,90E+02	1,15E+01	3,56E+02
Severe Nuisance	Pt	1,66E+02	1,24E+02	-7,42E+00	2,82E+02
Nuisance	Pt	1,04E+02	2,03E+02	1,43E+00	3,08E+02
Crop Growth Capacity	Pt	1,03E+01	2,66E+01	1,78E+00	3,87E+01
Wood Growth Capacity	Pt	5,45E+00	-1,03E+02	-4,36E+00	-1,02E+02
Fish and Meat production	Pt	-3,81E+00	-5,92E+00	-4,82E-01	-1,02E+01
Soil Acidification	Pt	2,13E+00	5,33E+00	1,36E-01	7,60E+00
Prod. Cap. Irrigation Water	Pt	x	x	x	x
Prod. Cap. Drinking water	Pt	x	x	x	x
Depletion of reserves	Pt	3,85E+04	2,11E+04	-1,52E+03	5,80E+04
Species Extinction	Pt	6,36E+01	9,29E+01	3,47E+00	1,60E+02
<b>Totale</b>	<b>Pt</b>	<b>4,43E+04</b>	<b>3,20E+04</b>	<b>-1,48E+03</b>	<b>7,49E+04</b>

Tabella 36: Punteggio totale con il metodo EPS 2000

Il danno totale vale 74.900 Pt, così ripartito:

- fase di pre-uso: 67 %;
- fase d'uso: 36 %;
- fine vita: -3 %.

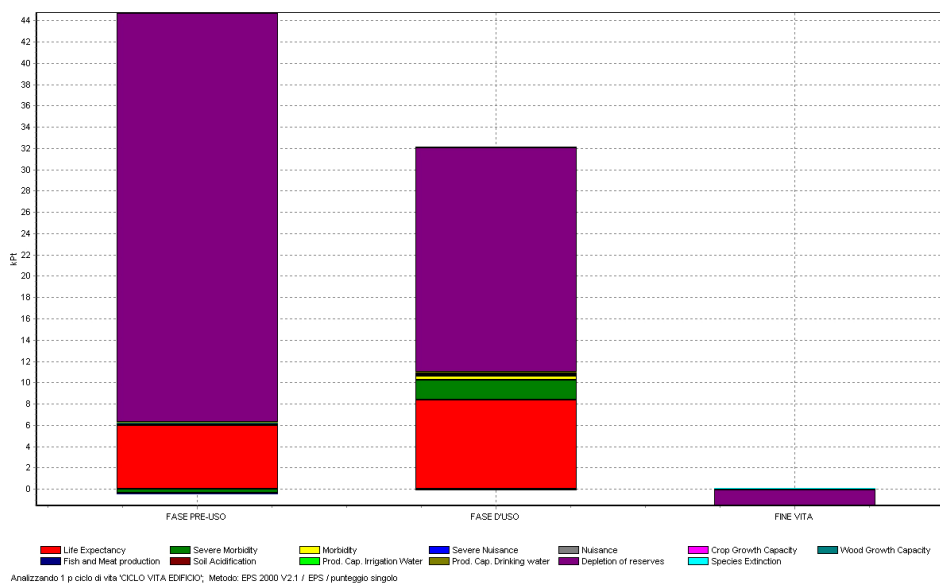


Grafico 9: Punteggio totale con il metodo EPS 2000

### 4.7.3 Metodo EDIP

Si riportano di seguito le tabelle e i grafici ottenuti utilizzando il metodo EDIP.

### Caratterizzazione

Categoria d'impatto	Unità	Totale	FASE PRE-USO	FASE D'USO	FINE VITA
Global warming (GWP 100)	g CO2	4,65E+07	-9,52E+06	5,42E+07	1,74E+06
Ozone depletion	g CFC11	4,74E+00	9,75E-01	3,66E+00	1,06E-01
Acidification	g SO2	4,87E+05	1,38E+05	3,40E+05	8,61E+03
Eutrophication	g NO3	5,67E+05	2,73E+05	2,80E+05	1,31E+04
Photochemical smog	g ethene	2,63E+04	4,37E+03	2,19E+04	4,17E+01
Ecotoxicity water chronic	m3	9,09E+07	4,65E+07	4,48E+07	-4,05E+05
Ecotoxicity water acute	m3	6,19E+06	2,03E+06	4,08E+06	7,02E+04
Ecotoxicity soil chronic	m3	3,16E+06	5,98E+05	2,58E+06	-2,12E+04
Human toxicity air	m3	6,03E+10	4,22E+10	1,96E+10	-1,46E+09
Human toxicity water	m3	4,91E+06	4,11E+06	9,68E+05	-1,68E+05
Human toxicity soil	m3	7,46E+05	6,73E+05	1,02E+05	-2,82E+04
Bulk waste	kg	x	x	x	x
Hazardous waste	kg	x	x	x	x
Radioactive waste	kg	x	x	x	x
Slags/ashes	kg	x	x	x	x
Resources (all)	kg	1,54E+01	1,31E+01	2,83E+00	-5,91E-01

Tabella 37: Valori per le categorie d'impatto con il metodo EDIP

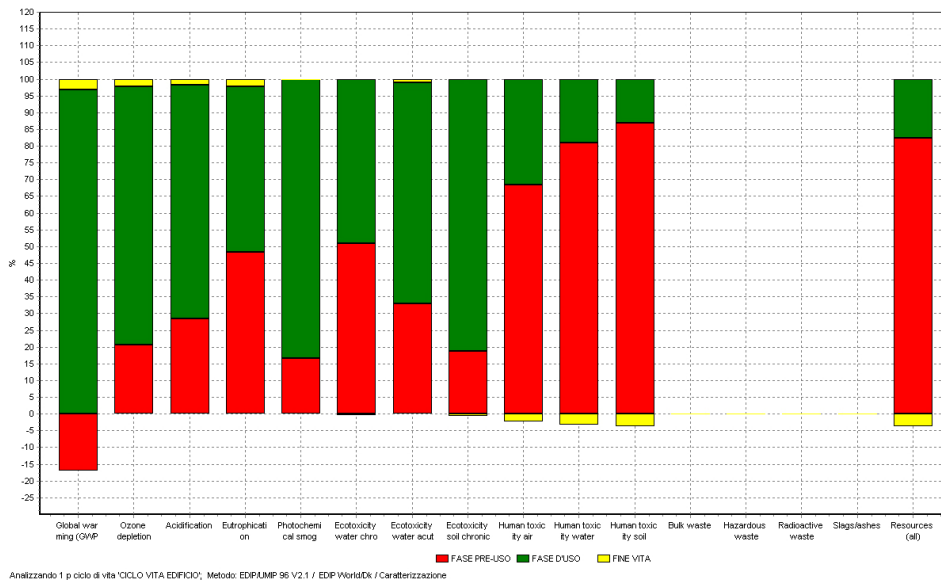


Grafico 10: Caratterizzazione degli impatti con il metodo EDIP

## Normalizzazione

Categoria d'impatto	Unità	FASE PRE-USO	FASE D'USO	FINE VITA	Totale
Global warming (GWP 100)		-1,09E+00	6,24E+00	2,00E-01	5,34E+00
Ozone depletion		4,83E-03	1,81E-02	5,24E-04	2,35E-02
Acidification		1,12E+00	2,74E+00	6,94E-02	3,92E+00
Eutrophication		9,18E-01	9,42E-01	4,40E-02	1,90E+00
Photochemical smog		2,19E-01	1,09E+00	2,09E-03	1,31E+00
Ecotoxicity water chronic		9,91E+01	9,54E+01	-8,63E-01	1,94E+02
Ecotoxicity water acute		4,23E+01	8,49E+01	1,46E+00	1,29E+02
Ecotoxicity soil chronic		1,99E+01	8,60E+01	-7,06E-01	1,05E+02
Human toxicity air		4,60E+00	2,13E+00	-1,59E-01	6,57E+00
Human toxicity water		6,94E+01	1,64E+01	-2,84E+00	8,30E+01
Human toxicity soil		2,17E+03	3,29E+02	-9,10E+01	2,41E+03
Resources (all)		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Tabella 38: Valori normalizzati con il metodo EDIP, per categorie d'impatto

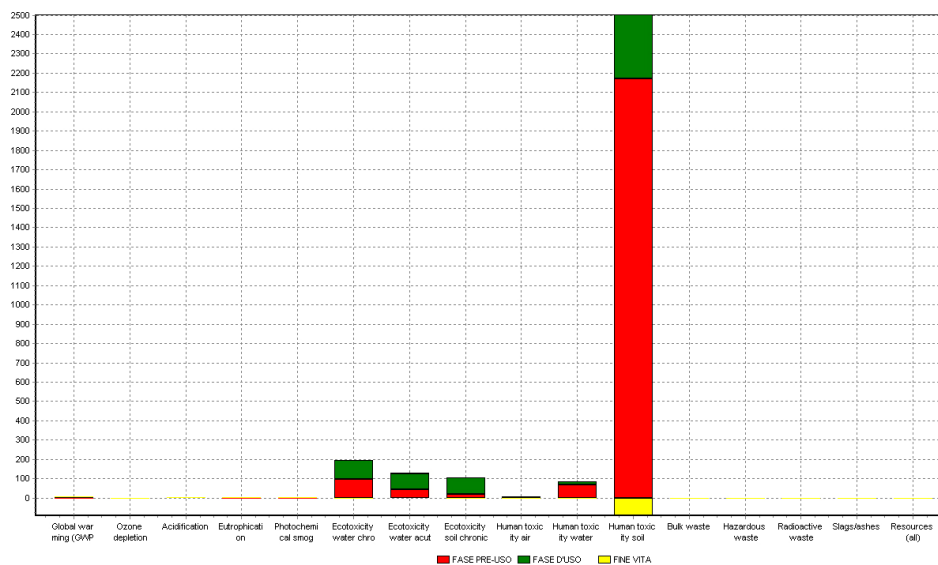


Grafico 11: Valori normalizzati con il metodo EDIP, per categorie d'impatto

Si nota anche in questo caso che la fine vita è negativa, e risulta quindi un vantaggio; inoltre il “global warming” risulta praticamente nullo. Risulta invece molto elevato il valore di “human toxicity soil”.

## Pesatura

Il danno totale vale 7.250 Pt, così ripartito:

- fase di pre-uso: 83 %;
- fase d'uso: 21 %;
- fine vita: -3 %.

Categoria d'impatto	Unità	FASE PRE-USO	FASE D'USO	FINE VITA	Totale
Global warming (GWP 100)	Pt	-1,42E+00	8,11E+00	2,60E-01	6,95E+00
Ozone depletion	Pt	1,11E-01	4,17E-01	1,21E-02	5,40E-01
Acidification	Pt	1,45E+00	3,56E+00	9,03E-02	5,10E+00
Eutrophication	Pt	1,10E+00	1,13E+00	5,28E-02	2,28E+00
Photochemical smog	Pt	2,62E-01	1,31E+00	2,50E-03	1,58E+00
Ecotoxicity water chronic	Pt	2,28E+02	2,19E+02	-1,99E+00	4,45E+02
Ecotoxicity water acute	Pt	9,72E+01	1,95E+02	3,36E+00	2,96E+02
Ecotoxicity soil chronic	Pt	4,58E+01	1,98E+02	-1,62E+00	2,42E+02
Human toxicity air	Pt	1,29E+01	5,97E+00	-4,45E-01	1,84E+01
Human toxicity water	Pt	1,74E+02	4,09E+01	-7,10E+00	2,07E+02
Human toxicity soil	Pt	5,43E+03	8,23E+02	-2,28E+02	6,03E+03
Resources (all)	Pt	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
<b>Totale</b>	<b>Pt</b>	<b>5,99E+03</b>	<b>1,50E+03</b>	<b>-2,35E+02</b>	<b>7,25E+03</b>

Tabella 39: Punteggio totale con il metodo EDIP

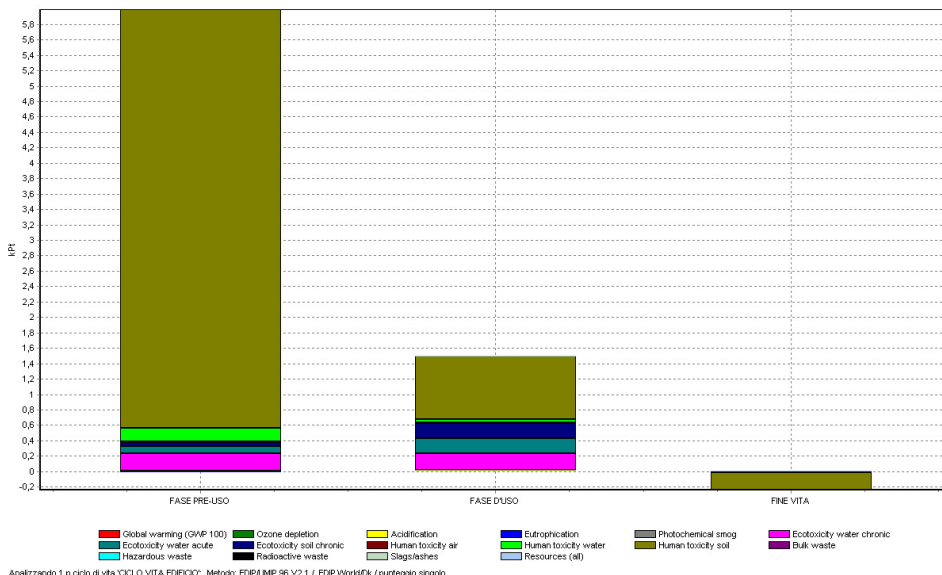


Grafico 12: Punteggio totale con il metodo EDIP

Nell'istogramma si nota l'assenza del colore rosso, "global warming"; notiamo però un valore molto elevato di "human toxicity soil". Analizziamo allora i contributi dei vari processi a tale categoria d'impatto.

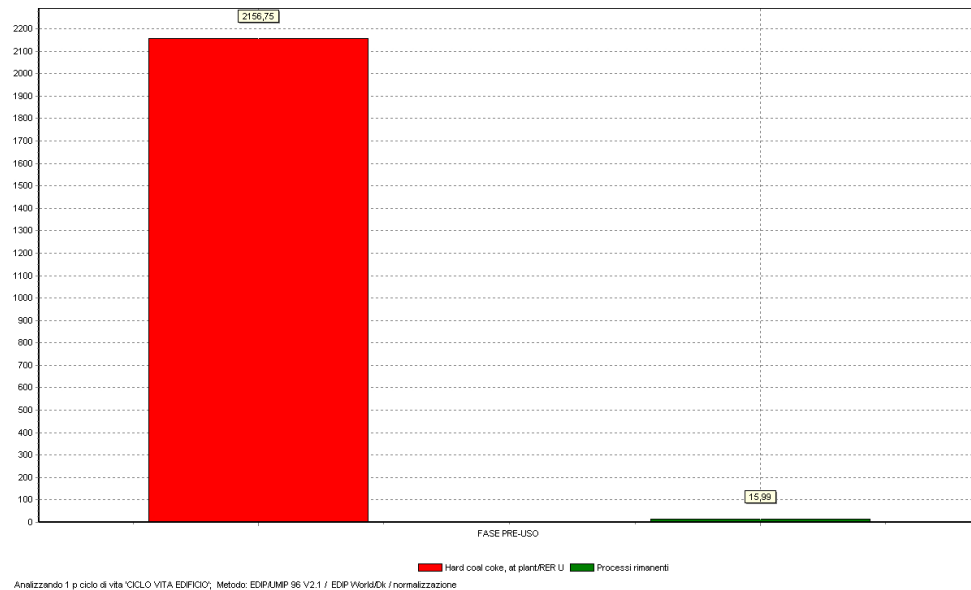


Grafico 13: Contributi alla categoria d'impatto "human toxicity soil"

È evidente che l'elevato impatto nella categoria "human toxicity soil" è dovuto quasi esclusivamente alla voce "hard coal coke", e quindi presumibilmente alla frazione di energia elettrica prodotta da combustione del carbone.

*Nota: in questo capitolo sono stati riportati i risultati che si sono considerati più significativi ai fini dell'analisi compiuta; tutti i risultati sono comunque presenti nel cd-rom allegato.*

## **4.8 Conclusioni**

In conclusione si può affermare che la paglia come materiale da costruzione possa davvero aiutare il raggiungimento degli obiettivi fissati dall'Unione Europea.

Come si è visto dai risultati, contrariamente a quanto avviene negli edifici tradizionali infatti, la fase d'uso risulta meno impattante rispetto a quella di pre-uso: ciò non significa che la fase di pre-uso sia più impattante del solito, ma piuttosto che quella d'uso lo sia molto meno. Ciò è facilmente comprensibile se si pensa che il consumo energetico in fase d'uso è molto limitato, essendo il fabbisogno energetico dell'edificio in esame di un ordine di grandezza inferiore a quello medio italiano (20 contro 300 kWh/m<sup>2</sup>·anno).

Inoltre come abbiamo visto nei risultati l'edificio contribuisce in maniera praticamente nulla al "global warming": da un lato perché come appena detto richiede poca energia, dall'altro perché costruita con materiali che durante la crescita assorbono la CO<sub>2</sub>.

Scopo dell'analisi era anche quella di poter fornire al progettista informazioni ambientali di supporto alle scelte di progetto; come si è visto nei risultati, la copertura risulta particolarmente impattante nella fase di pre-uso. Una soluzione è sicuramente utilizzare un materiale diverso dalla lamiera zincata; va però sottolineato che il progetto iniziale prevedeva la copertura in legno, e che la lamiera è stata montata solo provvisoriamente per motivi economici.

In ultimo si vuole esprimere l'importanza della metodologia LCA come strumento di valutazione dell'impatto ambientale di un edificio.

Nella Certificazione Energetica infatti si considera la sola energia "diretta" consumata in fase d'uso, cioè il fabbisogno energetico dell'edificio.

L'analisi LCA invece consente di andare più a monte, valutando sia l'energia consumata in fase d'uso, sia l'impatto legato alla produzione di quella energia (estrazione, lavorazione e trasporto combustibili), sia quella legata alla produzione a trasporto dei materiali da costruzione.

# Bibliografia

## Parte prima

- Direttiva 2002/91/CE (Energy Performance Building Directive)
- Decreto Legislativo n. 192 del 2005 e allegati
- Decreto Legislativo n. 311 del 2006
- Decreto Legislativo n. 115 del 2008
- Specifica tecnica UNI/TS 11300
- Decreto del Presidente della Repubblica n. 59 del 2009
- [www.casainnovativa.com](http://www.casainnovativa.com)
- Sito web del Consorzio Poroton: [www.poroton.it](http://www.poroton.it)
- Decreto Ministeriale del 26 giugno 2009 (Linee guida nazionali)
- Decreto Ministeriale dell'11 marzo 2008 (Risparmio energetico)
- Decreto Ministeriale del 26 gennaio 2010 (Aggiornamento del decreto 11 marzo 2008 in materia di riqualificazione energetica degli edifici)
- Sito web dell'Agenzia CasaClima: [www.agenziacasaclima.it](http://www.agenziacasaclima.it)
- Decreto Ministeriale del 14 gennaio 2008 (Norme tecniche per le costruzioni)
- Direttiva 89/106/CEE (Construction Products Directive)
- Decreto del Presidente della Repubblica n. 206 del 1993
- Regolamento UE 305/2011 (Commercializzazione dei prodotti da costruzione)
- Direttiva 98/34/CE del 22 giugno 1998
- Sito web del CEN: [www.cen.eu](http://www.cen.eu)

## Parte seconda

- Jones B. (2006), "Costruire con le balle di paglia", Aam Terra Nuova Editore
- Benati T. (2006), "Dallo stato del Nebraska un sistema costruttivo per abitazioni in paglia", Tetto & pareti in legno n. 2
- Lantschner N. (2009), "La mia CasaClima", Edition Raetia
- King B. (2003), "Load-bearing straw bale construction", EBNet

- Don Fugler (2000), “Moisture Properties of Plaster and Stucco for Straw bale Buildings”, CMHC Canada
- Don Fugler (1996), “Straw bale moisture sensor study”, CMHC Canada
- Gagnè L. (1997), Pilot Study of Moisture Control in Stuccoed Straw Bale Walls”, CMHC Canada
- Jolly R., Henderson S. (2000), “Straw Bale House Moisture Research”, CMHC Canada
- Vantangoli L. (2006), “Dei sistemi murari”, volume autoprodotta dall’autore
- Forti G. (1993), “Intonaci storici e non”, Edizioni SAFRA
- Theis B. (2003), “Straw bale fire safety”, EBNet
- Nause et al. (2003), “F-90 report”, iBMB Braunschweig
- UNI 10351:1994 (Materiali da costruzione. Conduttività termica e permeabilità al vapore)
- [www.espertocasaclima.com](http://www.espertocasaclima.com)
- Norma UNI EN ISO 6946:1999
- Albrecht W. (2003), “Wärmeleitfähigkeit nach DIN 52612”, FIW Monaco
- Sito web del Forschungsinstitut für Wärmeschutz: [www.fiw-muenchen.de](http://www.fiw-muenchen.de)
- Wimmer R. et al. (2000), “Heat insulation performance of straw bales and straw bale walls”, GrAT Vienna
- Sito web del GrAT: [www.grat.at](http://www.grat.at)
- Paulsen O. (2001), “Thermal insulation of non plastered straw bale, on edge, flat, two different densities”, Danish Technological Institute
- Sito web del Danish Technological Institute: [www.dti.dk](http://www.dti.dk)
- Pruteanu M. (2010), “Investigations regarding the thermal conductivity of straw”, Universitatea Tehnică “Gheorghe Asachi” din Iași
- Stone N. (2003) “Thermal Performance of Straw Bale Wall Systems”, EBNet
- McCabe J. (1993), “The thermal resistivity of straw bales for construction”, University of Arizona
- Amerio C., Sillitti G. (2006), “Elementi di impianti tecnici”, SEI
- Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri del 5/12/97
- Pedersen D.B. (2001), “Måling af luftlydisolation”, DELTA



- Sito web del laboratorio DELTA: [www.delta.dk](http://www.delta.dk)
- Campolongo G. (2008), “L’isolamento acustico nelle abitazioni”, Il giornale dell’ingegnere n. 16
- Sito web dell’associazione Edilpaglia: [www.edilpaglia.it](http://www.edilpaglia.it)

### **Parte terza**

- Lavagna M. (2008), “Life Cycle Assessment in edilizia”, Hoepli
- Neri P. (2008), “Verso la valutazione ambientale degli edifici”, Alinea Editrice s.r.l.
- Chiavetta C. (2009), “Applicazione dell’LCA nella valutazione dei benefici ambientali prodotti da tecnologie e processi eco-innovativi”, Tesi di laurea
- Sito web dell’ISPRA: [www.apat.gov.it](http://www.apat.gov.it)

### **Parte quarta**

- [www.pescomaggiore.org](http://www.pescomaggiore.org)
- [comitatorinascitapescomaggiore.blogspot.com](http://comitatorinascitapescomaggiore.blogspot.com)
- Stradaroli L., Strada L. (2011), “Progetto EVA”, Domus Aurea n. 1
- C.ab.au r&a (1982), “Il potere di abitare”, Libreria editrice fiorentina
- Blengini G. A., Di Carlo T., Fiorenza A., Zavaglia K. (2007), “Valutazione della sostenibilità ambientale di una casa a basso consumo energetico con metodologia LCA”, Politecnico di Torino
- Amerio C, Canavesio G. (1999), “Materiali per l’edilizia”, SEI
- Furiozzi B., Messina C., Paolini L. (2010), “Calcolo di elementi strutturali”, Le Monnier Scuola
- Gasparrelli N. (2007), “Manuale del geometra”, Hoepli
- Sito web di EnergoClub Onlus: [www.energoclub.it](http://www.energoclub.it)